

Titre: Méthodes de compensation des erreurs d'usinage utilisant la
Title: mesure sur machines-outils

Auteur: Rachid Guiassa
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Guiassa, R. (2012). Méthodes de compensation des erreurs d'usinage utilisant la
Citation: mesure sur machines-outils [Thèse de doctorat, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1023/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1023/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** René Mayer, & Marek Balazinski
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

METHODES DE COMPENSATION DES ERREURS D'USINAGE UTILISANT
LA MESURE SUR MACHINES-OUTILS

RACHID GUIASSA

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE MÉCANIQUE)

DECEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

METHODES DE COMPENSATION DES ERREURS D'USINAGE UTILISANT
LA MESURE SUR MACHINES-OUTILS

Présentée par : GUIASSA Rachid

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. BARON Luc, Ph.D., président

M. MAYER René, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. ACHICHE Sofiane, Ph.D., membre

M. TAHAN Souheil-Antoine, Ph.D., membre

DÉDICACE

À toute ma famille

REMERCIEMENTS

Mes études aux cycles supérieurs ont été effectuées sous la direction du professeur René Mayer. J'aimerais le remercier pour son excellente direction, sa disponibilité, ces conseils, ces critiques constructives et son soutien. Je lui suis reconnaissant.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Marek Balazinski pour accepter d'être mon co-directeur et de me donner la chance de bénéficier de sa longue expérience.

Je remercie messieurs : Luc Baron, Sofiane Achiche, professeurs à l'École Polytechnique de Montréal et Antoine Tahan, professeur à l'École de technologie supérieure, pour leurs temps consacré à l'évaluation de cette thèse ainsi que pour leurs acceptations de participer au jury.

Mes remerciements vont à Guy Gironne avec qui j'ai effectué mes tests expérimentaux. Son expérience professionnelle ainsi que son travail précis ont contribué à la réussite de mes expériences. Je remercie aussi François Menard pour son aide sur la CMM.

Je tiens à remercier Pratt & Whitney Canada pour le soutien financier ainsi que pour le stage qu'elle m'a offert. Je remercie spécialement l'ingénieur Felix-Étienne Delorme.

Je remercie toute ma famille pour son soutien.

Finalement, mes remerciements vont à ma femme pour sa patience et son soutien.

RÉSUMÉ

Cette thèse vise à développer des modèles mathématiques qui utilisent les données d'inspection en semi-finitions pour formuler la compensation de la passe de finition afin d'améliorer la précision d'usinage. Pour la rentabilité industrielle, les tâches de mesure et de compensation doivent être effectuées sous la condition de l'usinage à porte fermée sans interventions humaines. La mesure sur machines-outils est utilisée pour inspecter la pièce immédiatement après la coupe tout en gardant le même montage. Elle détecte les défauts de fabrication vus par la machine-outils. Le fléchissement du système machine-outil-pièce et l'imprécision des dimensions de l'outil de coupe sont les sources les plus importantes de ces défauts. La pièce usinée peut ainsi être inspectée en semi-finitions pour prédire les déviations systématiques qui pourraient survenir plus tard à la passe de finition. Donc, afin de produire une pièce avec une précision acceptable, des actions de correction peuvent être dérivées pour anticiper l'erreur attendue. L'erreur est modélisée comme étant la somme de deux composantes. Une composante indépendante de la profondeur de coupe et liée à la dimension de l'outil tel que l'usure. L'autre dépend de la profondeur de coupe telle que le fléchissement. Un modèle général est présenté, qui relie seulement les résultats d'inspection sur machine-outils pour compenser la passe finale. Le coefficient variable de la compliance de coupe relie, en mode multi-passe, le fléchissement total à la profondeur de coupe. Il est utilisé pour estimer la compensation de la trajectoire. Le modèle est capable de prendre en compte l'effet de la variation de la profondeur de coupe et de l'enlèvement de la matière dans l'estimation de la compensation. Afin de générer la trajectoire compensée sous forme continue à partir de mesures discrètes, une technique de déformation de B-Spline est adoptée pour les données disponibles et appliquées pour calculer la trajectoire compensée à partir d'un nombre limité de vecteurs de compensation discrètes. Les résultats montrent que les erreurs mesurées sur machine-outils peuvent être réduites significativement en utilisant le modèle de compensation proposé. La machine à mesurer tridimensionnelle est utilisée pour vérifier la mesure sur machine de bague étalon. Pour une plaque mince, une erreur de 78 μm est réduite à moins de $\pm 3 \mu\text{m}$. Pour une paroi circulaire avec une raideur variable l'erreur est réduite de -60 à $\pm 6 \mu\text{m}$. Pour une plaque mince de forme libre semblable à un profil aérodynamique, représenté par B-Spline, l'amélioration est de 140 μm à $\pm 20 \mu\text{m}$.

ABSTRACT

On-machine measurement process is used to inspect the part immediately after the cut without part removal and additional setups. It detects the machining defects visible to the machine tool. The system machine-tool-part deflection and the cutting tool dimension inaccuracy are the most important sources of these defects. The machined part can be inspected, at the semi-finishing cut level to identify systematic defects that may occur later at the finishing cut. Therefore, corrective actions can be derived to anticipate the expected error in order to produce a part with acceptable accuracy. For industrial profitability, the measurement and the compensation tasks must be done under the closed door machining requirement without human interventions.

This thesis aims to develop mathematical models that use the data inspection of previous cuts to formulate the compensation of the finishing-cut. The goal of the compensation is to anticipate the expected error which is identified under two components. One is independent on the depth of cut and is related to the cutting tool dimension such as the wear. The other is dependent on the cutting depth such as the deflection. A general model is presented which relies solely on-machine probing data from semi-finishing cuts to compensate the final cut. A variable cutting compliance coefficient relates the total system deflection to the depth of cut in multi-cut process. It is used to estimate the compensation of the tool path. The model is able to take into account the effect of the cutting depth variation and the material removal in the estimation of the error at the finishing-cut. In order to generate the continuous compensated tool path from discrete measurements, a B-Spline deformation technique is adapted to the available data and applied to compute the compensated tool path according to a restricted number of discrete compensation vectors.

The results show that the on-machine probed errors can be significantly reduced using the proposed compensation model. The coordinate measurement machine is used to verify the on machine measurement of a ring gauge. For a simple straight thin wall, an error of 78 μm is reduced to less than $\pm 3 \mu\text{m}$. For a circular wall with variable stiffness using a multi-cut process, the error is reduced from -60 μm to $\pm 6 \mu\text{m}$. For a free form thin wall similar to airfoil profile represented with the B-Spline, the improvement is from +140 μm to $\pm 20 \mu\text{m}$.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
INTRODUCTION.....	1
Description du problème	1
Objectifs	2
Hypothèses	2
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Modélisation et compensation des erreurs affectant la précision d’usinage	4
1.1.1 Erreur volumétrique et cinématique	5
1.1.2 Erreur thermique	7
1.1.3 Erreur causée par les charges de coupe	8
1.1.4 Stratégies de compensation et d’élimination des erreurs	12
1.2 Amélioration de la précision par l’usinage, l’inspection et la compensation en boucle fermée	15
1.2.1 Stratégies de compensation	15
1.2.2 Implémentation de la compensation.....	17

1.2.3	Erreur de mesure sur machine-outil	18
1.3	Modèles de compensation basés sur les NURBS	18
1.3.1	Définition et utilisation des NURBS	18
1.3.2	Compensation de la trajectoire d'outil par l'ajustement des courbes NURBS	19
CHAPITRE 2	ORGANISATION GÉNÉRALE.....	22
CHAPITRE 3	PREDICTIVE COMPLIANCE BASED MODEL FOR COMPENSATION IN MULTI-PASS MILLING BY ON-MACHINE PROBING.....	25
3.1	Abstract	25
3.2	Introduction	26
3.3	Machining error model.....	26
3.4	Machining error compensation model.....	28
3.4.1	Cutting compliance approach.....	28
3.4.2	General model	29
3.4.3	Compensation model through three cutting passes	30
3.5	Experimental validation	31
3.6	Conclusion.....	32
3.7	References	32
CHAPITRE 4	CLOSED DOOR MACHINING-ERROR COMPENSATION OF COMPLEX SURFACES USING THE CUTTING COMPLIANCE COEFFICIENT AND ON- MACHINE MEASUREMENT FOR A MILLING PROCESS.....	42
4.1	Abstract	42
4.2	Introduction	43
4.3	Modeling and compensation of error detected using on-machine measurement in a multi-cut process	44
4.3.1	Error model	44

4.3.2	On machine probe based technique for tool offset error estimation	45
4.3.3	Cutting compliance coefficient	46
4.4	Continuous tool path compensation from a set of discrete compensation vectors.....	48
4.4.1	The tool path as a B-Spline	48
4.4.2	Tool path adjustment strategy for B-Spline deformation.....	49
4.5	Experimental validation	50
4.6	Conclusion.....	51
4.7	References	52
CHAPITRE 5	DISCUSSION GENERALE	65
CHAPITRE 6	CONTRIBUTION.....	68
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		69
BIBLIOGRAPHIE		71
ANNEXES		76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les erreurs liées à l'articulation prismatique Y.....	7
---	---

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Erreurs de mouvement d'une articulation prismatique de machine [3].	5
Figure 1-2. Défaut de perpendicularité entre deux axes et son effet sur la pose d'outil.	6
Figure 1-3 Illustration des catégories des erreurs pour une machine biaxes [4].	6
Figure 1-4. Influence d'un paramètre d'erreur angulaire de machine-outil sur la précision de la pièce finie [5].	7
Figure 1-5. Modélisation du comportement dynamique de l'outil-pièce [11].	9
Figure 1-6 : Allure générale des lobes de stabilité [12].	9
Figure 1-7. Discrétisation de l'outil en disques pour calculer l'effort total [14].	10
Figure 1-8. Répartition uniforme de l'effort de coupe sur la zone de contact pour prédire approximativement la déformation [19].	12
Figure 1-9. Méthode de compensation de Cho et al. : a) Usinage avec profondeur radiale de coupe variable, b) Définition des paramètres de tolérance et d'erreur, c-d) Base de donnée des paramètre d'erreurs en fonction de la profondeur de coupe [27].	13
Figure 1-10. Compensation par la technique de miroir adapté à partir de [29]	16
Figure 1-11. Gauche, pièce test. Droite, la répartition de l'erreur d'usinage après semi finition [38].	17
Figure 1-12. Concept de la méthode de compensation de l'erreur géométrique de Lei et Sung, adaptée à partir de [42].	19
Figure 3-1. Equivalent model of the total system deflection	35
Figure 3-2 Compensation by error anticipation	36
Figure 3-3 Multiple cutting passes parameterization and compliance coefficient evolution	37
Figure 3-4 Test parts, made of aluminum, mounted on machine tool and their principal dimensions in mm.	38
Figure 3-5 Evolution of the cutting compliance coefficient during six successive inspected cuts at $x = 125$ mm, data gathered using OMM.	39

Figure 3-6 Compensation results for linear profile	40
Figure 3-7 Left, Tool path and nominal depth. Right, form and size defect of the circular profile after two investigated cuts (Cut 1-2) and after the compensated cut (Cut 3).....	41
Figure 4-1. Multi-cut process	54
Figure 4-2 Tool offset error estimation. According to the error model, it is the deviation of the actual profile after the cut from the corresponding desired profile when the actual depth of cut tends toward zero.....	55
Figure 4-3 Linear estimation of TOE.....	56
Figure 4-4. Illustration of the C3 evolution, (a) general model, (b) linearized model.....	56
Figure 4-5. Data points adjustment	57
Figure 4-6 Flowchart of the NC program compensation	58
Figure 4-7. Test part	59
Figure 4-8. Left, measured points locations along the 2D profile. Right, B-Spline parameter values of the corresponding measured points.	60
Figure 4-9. On machine measured error for three cut performed without compensation for the test part.....	61
Figure 4-10. Tool path planning for depth of cut reduction. At the zero programmed depth, the measured error is assumed equal to the TOE.....	62
Figure 4-11. The discrete and the continuous (B-Spline deformation) compensation of the tool path for the finishing cut of the 3CP performed for the second feature of the part from Figure 4-7.....	63
Figure 4-12. On machine measured error for the 3CP with compensation for the finishing cut performed for the second feature of the part shown in Figure 4-7.....	64
Figure A 1. Principe de miroir pour anticiper l'erreur d'usinage [7, 8].....	83
Figure A 2. Estimation de ε_{to}	84
Figure A 3. Séparation des deux composantes d'erreur.....	85

Figure A 4. Vérification du système de mesure sur machine-outil. a-comparaison du défaut de forme mesuré sur machine-outil directement après la coupe et le même défaut obtenu indépendamment par comparateur. b-variation par rapport aux dimensions nominales d'une bague étalon mesurée sur machine-outil (OMM) et sur machine à mesurer tridimensionnelle (CMM).	86
Figure A 5. Profil 2D sous forme d'aube sur une pièce en aluminium et les paramètres de coupe utilisés.....	87
Figure A 6. Implémentation de la procédure d'estimation de l'erreur ε_{to}	88
Figure A 7. Répartition de la déviation normale (amplifiée) au profil nominale le long du profil de l'aube 2D de la Figure A 5. L'erreur maximale est 212 μm , détectée après la semi-finition 2 dans la zone où la pièce est plus compliant (faible épaisseur). Après compensation, l'erreur maximale est moins de 20 μm	89
Figure B 1. Multiple cutting passes design	97
Figure B 2. Cutting compliance coefficient: a- general model, b- linearized model	98
Figure B 3. Experiments: a) Straight thin clamped wall. b) Form defect in multiple cutting passes of the part in a). c) Test part with 2D free form (blade). d) CAD model of the part in c).	99
Figure B 4. Machining error comparison: a- curvilinear coordinate parameter, b- cut 1 and c- cut 2	100
Figure B 5. Results: The amplified normal deviation of the measured profile compared to the desired profile. Three successive inspected cuts for a) the first profile (uncompensated) and for b) the second profile (3-th cut compensated)	101
Figure C 1. Multi-pass process.....	109
Figure C 2. NC code deformation process	110
Figure C 3. Data points adjustment.....	111
Figure C 4. Curvilinear parameter value along the 2D B-spline curve of the desired profile	112
Figure C 5. Designed and manufactured shape.....	112
Figure C 6. Discrete and continuous (B-Spline) compensation	113

Figure C 7. The normal deviations of the machined profile, cut 1 and 2 are without compensation, cut 3 is with compensation.	114
--	-----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

\mathbf{c}_s	Vecteur de compensation calculé pour la position s
d_f^c	Cumule (somme) des profondeurs de coupe
d_{ni}	Profondeur de coupe nominale pour la passe i
d_i	Profondeur de coupe mesurée pour la passe i
FFD	Déformation des formes libres (Free Form deformation)
$J(\mathbf{P})$	Fonction objective à minimiser pour obtenir les points de contrôle B-Spline
L_j	Polynômes de Lagrange
MCP	Processus de la coupe multi-passe
\mathbf{n}_s	Vecteur normale à trajectoire de l'outil à la position s
OMM	Mesure sur machines-outils
PII	Processus de l'inspection intermittente
\mathbf{P}_i	Coordonnées nominales des points de contrôle de la trajectoire de l'outil
\mathbf{P}'_i	Coordonnées compensées des points de contrôle de la trajectoire de l'outil
\mathbf{Q}_s	Coordonnées nominales des points de la trajectoire de l'outil
\mathbf{Q}'_s	Coordonnées ajustées des points de la trajectoire de l'outil
u_i	Paramètre curviligne de B-Spline correspond à la position mesurée i
ε	Amplitude de l'erreur mesurée sur machine-outils
ε_r	Composante de l'erreur ε liée au fléchissement
ε_{to}	Composante de l'erreur ε liée au défaut de géométrie de l'outil
ρ_i	Coefficient de la compliance de coupe évalué après la coupe i
μ	Ratio des profondeurs de coupe
$\Delta\mathbf{P}_i$	Ajustement des points de contrôle

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Amélioration de la précision d'usinage par l'inspection sur machine-outil et l'ajustement de la trajectoire de coupe	76
ANNEXE B Practical implementation of the cutting compliance induced error compensation procedure	90
ANNEXE C Continuous tool path compensation using discrete on machine measurement	102

INTRODUCTION

L'usinage est une opération de base utilisant les machines-outils pour la production des pièces mécaniques. À partir des dimensions imposées par la conception, la machine est programmée pour effectuer l'enlèvement de la matière nécessaire pour l'obtention de la surface finale désirée. Ceci passe par le calcul de la trajectoire de l'outil avec une précision contrôlée. Après usinage, la pièce produite doit répondre à un critère de conformité dimensionnelle pour pouvoir assurer sa fonction dans le mécanisme pour lequel elle est fabriquée.

L'imprécision des pièces fabriquées sur machines-outils est causée par une multitude d'erreurs. Certaines erreurs sont liées aux performances volumétriques de la machine-outil qui sont dues principalement aux déviations systématiques de position de l'outil par rapport à la pièce et ne sont pas détectable par palpéage embarqué sur la machine-outils. Une machine usée ou mal ajustée affecte, par ses imprécisions de mouvement et son comportement vibratoire, la qualité dimensionnelle et d'état de surface de la pièce usinée. D'autres erreurs sont détectables par palpéage sur machines-outils après usinage. Ces erreurs sont liées au processus d'usinage et sont dues principalement au phénomène de la déflexion sous l'effort de coupe et à l'usure et l'imprécision de la géométrie de l'outil de coupe.

La métrologie est utilisée traditionnellement pour vérifier la conformité des dimensions de la pièce finie avec le dessin de définition. Dans l'industrie aéronautique, certaines pièces stratégiques doivent être usinées avec précision pour respecter des tolérances de fabrication sévères. En utilisant l'inspection sur machine-outils, les défauts de fabrication peuvent être mesurés en semi-finition. Ceci permet de formuler des actions immédiates de correction afin d'anticiper les défauts attendus en finition. Dans ce cas, le rôle de la métrologie est non seulement d'accepter ou de rejeter les pièces mais aussi l'acquisition en ligne des informations permettant l'ajustement des paramètres du processus de fabrication pour assurer une production compétitive haute performance.

Description du problème

Lors d'une opération d'usinage, la trajectoire d'outil est calculée avec grande précision pour enlever la matière nécessaire afin de rendre la pièce aux dimensions nominales dictées par le

design. Après usinage, la géométrie obtenue dévie par rapport à celle désirée. La pièce est rejetée (non conforme) si l'amplitude de la déviation dépasse celle tolérée.

Les forces générées par la coupe, l'imprécision cinématique et géométrique de la machine, les défauts de la géométrie et du montage de l'outil de coupe ainsi que d'autres sources d'erreurs affectent la précision du positionnement relatif de l'outil par rapport à la pièce, ce qui est à l'origine des défauts de fabrication.

L'inspection de la pièce, juste après l'opération d'usinage, par la machine elle-même est possible. Avant la phase de finition, la pièce doit être inspectée pour évaluer les erreurs d'usinage. En finition, la trajectoire initiale de l'outil doit être ajustée par une correction bien calculée en tenant compte des erreurs évaluées en semi-finitions pour anticiper les défauts de fabrication attendues sur la pièce finie.

À travers cette thèse, notre contribution se concentre sur le développement de deux modèles mathématiques capables de répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la meilleure amplitude de la correction qu'on peut estimer pour corriger la trajectoire d'outil en utilisant des mesures sur machine-outils à des points spécifiques?
2. Comment produire la trajectoire compensée et continue de l'outil en utilisant la trajectoire non compensée et des compensations discrètes calculées à des points spécifiques?

Objectifs

L'objectif de cette thèse est de développer des modèles d'estimation et de compensation des erreurs liées au processus d'usinage en exploitant la fonctionnalité du palpéage sur machines-outils.

Les objectifs spécifiques sont :

- modéliser l'erreur mesurée immédiatement après la coupe par palpéage sur la machine-outils;
- formuler la compensation de la trajectoire de l'outil en finition;
- compenser les erreurs d'usinage pour différentes géométries.

Hypothèses

- Sources des erreurs : Les erreurs produites au cours de l'usinage et mesurées sur machines-outils sont dues principalement à la déflexion et à l'imprécision de l'outil de

coupe. La machine outil est supposée capable de suivre avec précision la trajectoire programmée;

- la profondeur de coupe est un paramètre important dans le contrôle des erreurs produites au cours de l'usinage;
- reproductibilité des erreurs : le matériau de la pièce et de l'outil, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont gardées inchangées entre les passes inspectées et la passe compensée pour que, la variation de l'erreur correspondante puisse être dues seulement à la variation de la compliance de la pièce et à la variation de la profondeur de coupe.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature concernant les catégories et le comportement des erreurs affectants la précision d'usinage et discute certaines méthodes de modélisation et de compensation disponibles dans la littérature. Des méthodes de compensation utilisant la machine-outils pour mesurer les erreurs d'usinage sont aussi présentées.

1.1 Modélisation et compensation des erreurs affectant la précision d'usinage

Les dimensions finales des pièces usinées sur machines-outils doivent répondre aux critères de conformité exigés par la conception. D'un côté l'évolution technologique de la conception nécessite de plus en plus des tolérances assez sévères pour des raisons de montage et de rôle des pièces durant leurs cycles de vies. De l'autre côté, la modernisation des machines-outils, pour répondre aux exigences du produit fini, reste insuffisante. Pour ces raisons, de multiples recherches sont menées pour étudier les erreurs affectant la précision d'usinage ainsi que les méthodes d'élimination de leurs effets. La précision des pièces fabriquées sur machines-outils se trouve affectée par une variété d'erreurs que l'on peut classer grossièrement [1] comme suit:

- erreurs géométriques : causées par les défauts de la structure et des composants de la machine-outil;
- erreurs cinématiques : causées par l'imprécision du mouvement relatif des composants de la machine;
- erreur causée par la dilatation thermique des composants de la machine;
- erreur causée par l'effort de coupe;
- erreur résultant de l'usure de l'outil de coupe;
- autres erreurs causées par :
 - la rotation de la broche et la variation de l'effort de coupe (dynamique);
 - la fixation de la pièce;
 - le fléchissement par force d'inertie des composants de la machine;
 - l'algorithme d'interpolation;
 - l'encodeur de position.

Les erreurs géométriques, cinématiques et thermiques constituent les erreurs quasi-statiques associées au comportement à basse vitesse et varient peu à court terme. D'autres erreurs affectant la qualité de la surface sont les erreurs dynamiques qui sont causées principalement par la variation avec le temps de l'effort de coupe et le comportement dynamique de la machine-outil. Ces erreurs se combinent pour constituer une erreur résultante affectant directement la précision dimensionnelle de la pièce. Impliquer toutes ces erreurs répertoriées dans un modèle pour améliorer la précision est une procédure complexe. Les principales erreurs étudiées dans la littérature sont : les erreurs géométrique, cinématique, thermique, et celles causées par l'effort de coupe [2].

1.1.1 Erreur volumétrique et cinématique

L'erreur volumétrique d'une machine-outil se définit comme l'erreur de mouvement relatif entre l'outil et la pièce. Une cause importante de l'erreur volumétrique provient du mouvement de chaque axe de la machine qui peut être décrit par six degrés de liberté: trois translations et trois rotations, alors qu'idéalement un seul degré de liberté est présent suivant l'axe du mouvement souhaité qu'il soit linéaire ou de rotation.

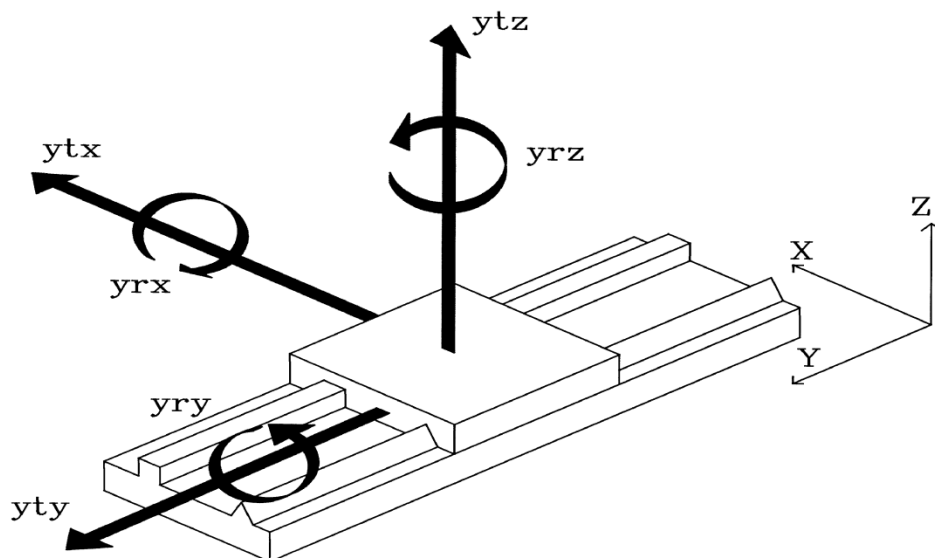


Figure 1-1. Erreurs de mouvement d'une articulation prismatique de machine [3].

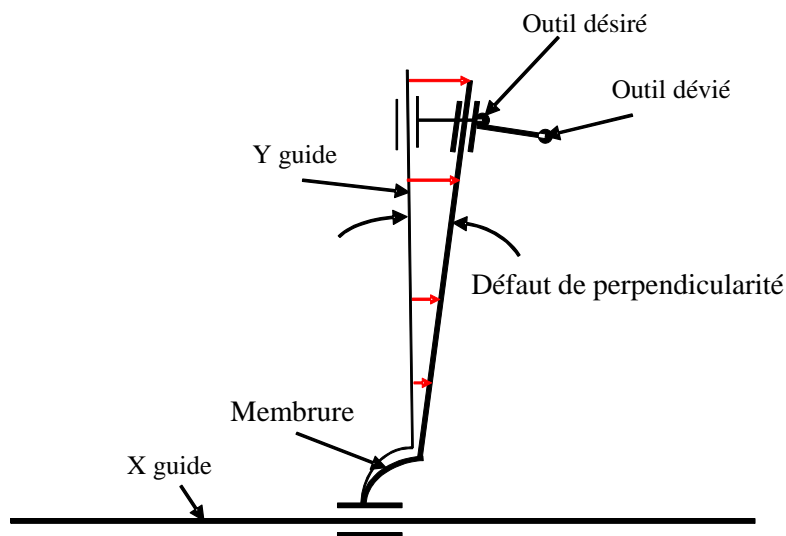


Figure 1-2. Défaut de perpendicularité entre deux axes et son effet sur la pose d'outil.

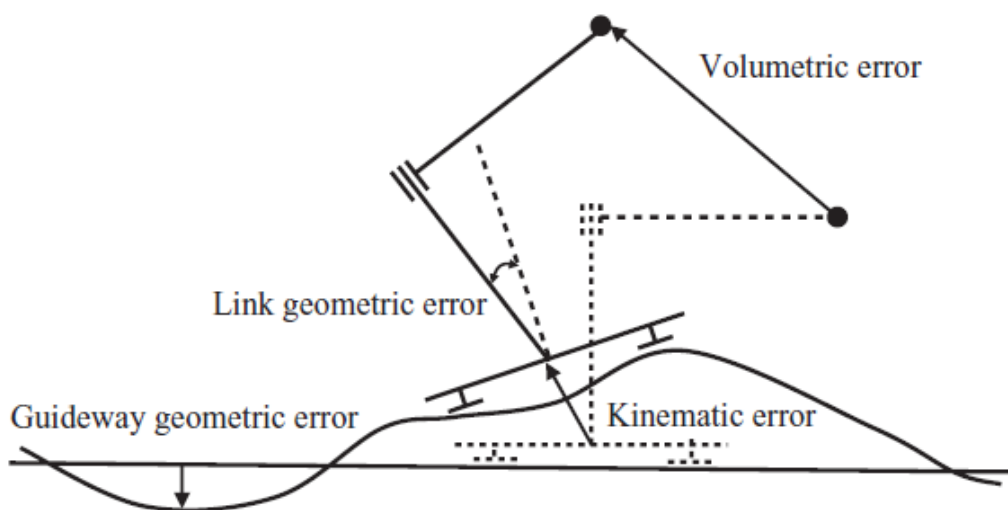


Figure 1-3 Illustration des catégories des erreurs pour une machine biaxes [4].

Selon la norme ISO 230-1 [3], les six erreurs d'une articulation prismatique suivant l'axe Y illustrées à la Figure 1-1 sont énumérées au Tableau 1.1:

Comme montré à la Figure 1-4, une relation entre défaut de fabrication et erreur de machine-outil peut être établie. Pour une machine biaxes, plusieurs catégories d'erreurs peuvent contribuer à l'erreur volumétrique causant un mauvais positionnement de l'outil comme l'illustre la Figure 1-3 [4].

Tableau 1.1 Les erreurs liées à l'articulation prismatique Y

Erreur	Description
yty	erreur de positionnement selon l'axe de mouvement y (écart d'échelle)
ytx	erreur de positionnement selon l'axe x (erreur de rectitude)
ytz	erreur de positionnement selon l'axe z (erreur de rectitude)
ryy	erreur de rotation suivant l'axe du mouvement (roulis)
ryz	erreur de rotation suivant l'axe z (lacet)
ryx	erreur de rotation suivant l'axe x (tangage)

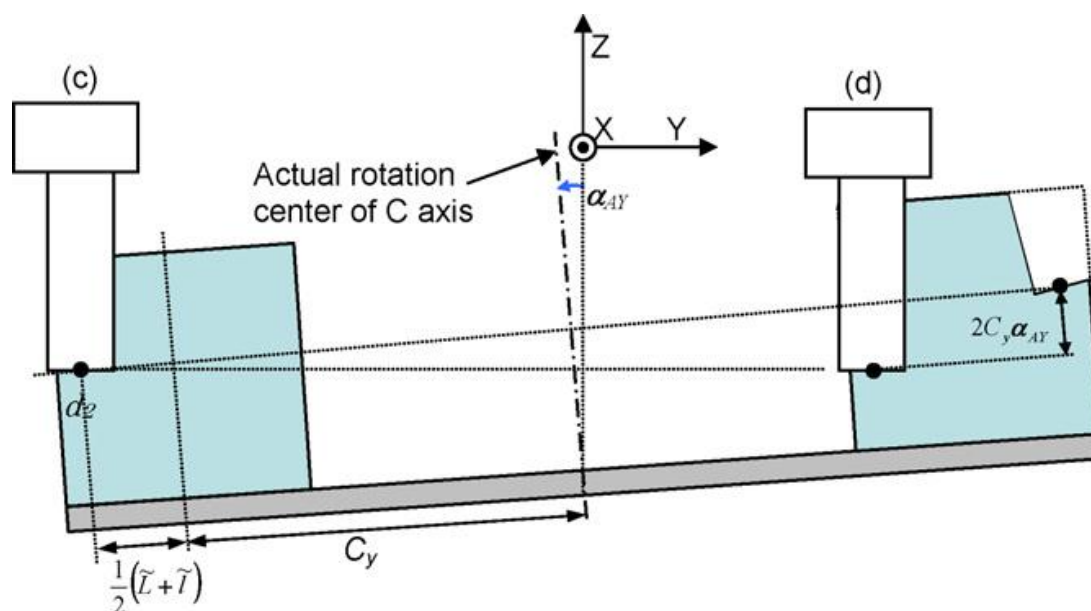


Figure 1-4. Influence d'un paramètre d'erreur angulaire de machine-outil sur la précision de la pièce finie [5].

L'erreur résultant de la déformation des guides peut être significative produisant une erreur cinématique articulaire [6].

1.1.2 Erreur thermique

La variation de la température des éléments de la machine-outil provoque des déformations qui affectent la précision de positionnement de l'outil par rapport à la pièce. Plusieurs sources de chaleur peuvent être citées [7]:

- a) roulements,
- b) huile hydraulique,
- c) pompes et moteurs,
- d) glissières,
- e) action de coupe et de copeaux,
- f) autres sources de chaleur (environnement extérieur).

Les erreurs thermiques peuvent être divisées en deux catégories. La première inclut les erreurs qui varient en fonction de la température mais pas en fonction des coordonnées absolues. La deuxième inclut les erreurs qui changent aussi avec les coordonnées machine. La théorie thermo-élastique des structures est souvent utilisée [8] pour modéliser l'effet du comportement thermique de la structure de la machine sur sa précision. Généralement, l'erreur thermique se base sur des modèles empiriques et s'appuie sur la collecte des données sous des conditions spécifiques. Ma [9] a proposé une analyse modale utilisant la théorie thermo-élastique et l'analyse par éléments finis. Les chercheurs accordent beaucoup d'importance à la collecte des données (température), au choix de l'emplacement des capteurs et de leurs nombre. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la prédiction de l'erreur thermique. Certains auteurs introduisent les erreurs thermiques avec les erreurs géométriques et cinématiques dans le même modèle. Chen et al. [10] proposent un modèle avec 32 paramètres d'erreur au lieu de 21 pour une machine 3-axes incluant 11 paramètres supplémentaires pour représenter l'erreur thermique.

1.1.3 Erreur causée par les charges de coupe

Les charges de coupe sont une source d'erreurs causant une déviation de l'outil par rapport à la pièce affectant la géométrie désirée de la surface usinée. Elles provoquent des déformations élastiques de la pièce, de l'outil et de la machine. La géométrie de l'outil et le processus de coupe (enlèvement de matière et vitesse de coupe) provoquent un comportement vibratoire par l'excitation périodique de la structure (machine-outil-pièce).

L'effort de coupe est à l'origine de deux types d'erreurs : l'erreur dynamique et l'erreur statique.

Erreur dynamique

L'erreur dynamique est causée principalement par les vibrations résultantes du processus de coupe. L'amplitude et la fréquence des vibrations des deux branches de la structure, lié à l'outil et

à la pièce, provoquent une irrégularité de la coupe. Les vibrations causées par l'effort de coupe dépendent des paramètres d'usinage (profondeur de coupe et vitesse de rotation de la broche).

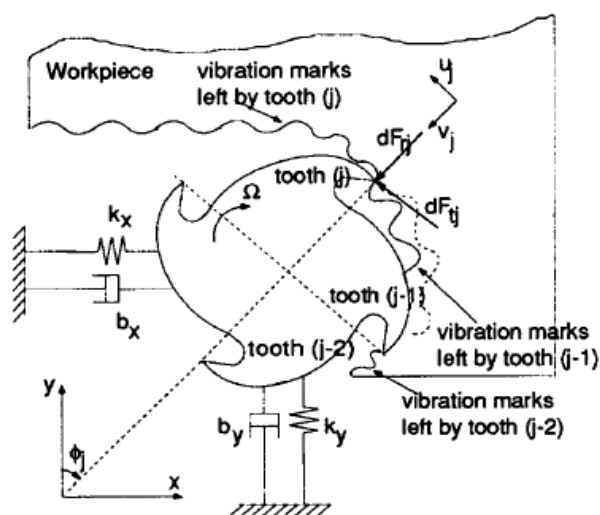


Figure 1-5. Modélisation du comportement dynamique de l'outil-pièce [11].

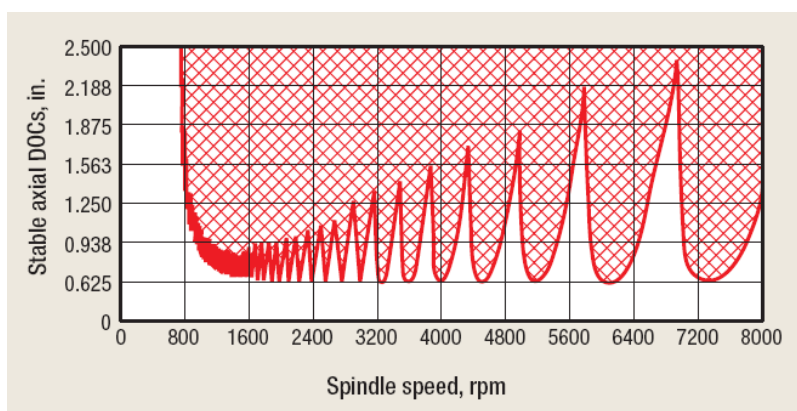


Figure 1-6 : Allure générale des lobes de stabilité [12].

Ce comportement dynamique affecte principalement la qualité de surface usinée mais aussi sa position [13]. Pour réduire ces vibrations, Altintas et Budak [11] proposent une modélisation de la réponse à l'excitation périodique de l'outil de coupe, illustré sur la Figure 1-5. L'objectif est de définir une zone de stabilité (lobes de stabilité) illustrée sur la Figure 1-6. Pour une vitesse de rotation donnée, la profondeur de coupe maximale permise pour que le système soit stable peut être déduite. La procédure expérimentale pour définir ces lobes de stabilité est basée sur l'analyse modale et l'identification de la fonction de transfert en utilisant un instrument source d'une force

excitant la structure. Les vibrations résultant sont mesurées par un accéléromètre fixé sur la broche et analysées pour calculer la profondeur de passe critique.

Erreur statique

Le processus de l'enlèvement de la matière par un outil de coupe, comme en fraisage hélicoïdal, nécessite des efforts de coupe. Ce procédé provoque des déformations élastiques pour l'ensemble (outil, pièce et machine). La déviation résultante affecte la précision des surfaces usinées où la déviation de chaque élément dépend de sa rigidité. La prédiction avec précision du défaut d'usinage, résultant de ces déformations, est une opération compliquée. Généralement, pour pouvoir modéliser ces erreurs, les chercheurs les traitent séparément.

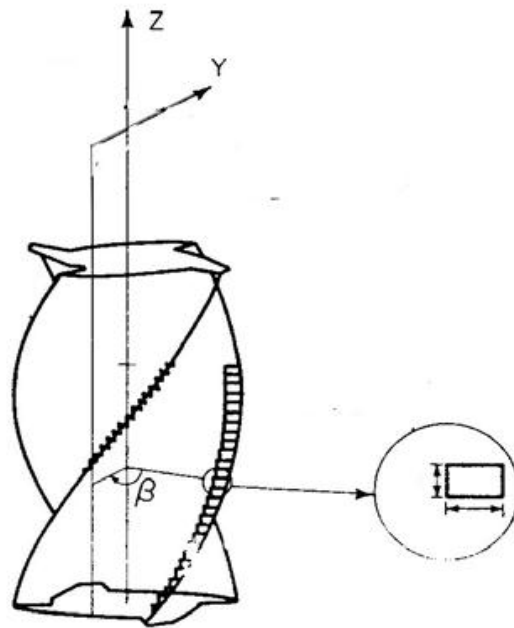


Figure 1-7. Discretisation de l'outil en disques pour calculer l'effort total [14].

Fléchissement de l'outil

En fraisage périphérique, l'outil fléchit sous l'effort de coupe. Donc, il ne peut pas couper la totalité de la quantité de matière prévue pour la coupe. Pour surmonter ce problème, des approches de prédiction et de compensation peuvent être envisagées [15]. Le bon choix des conditions de coupe, à savoir la vitesse d'avance et la profondeur radiale et axiale de coupe peut réduire la déflexion de l'outil [16, 17]. Ces approches sont d'une efficacité limitée et peuvent affecter le choix des conditions de coupe optimisant la production.

Comme la géométrie de l'outil de coupe peut être hélicoïdale compliquant la modélisation de l'effort de coupe, Kline et al. [18] discrétisent l'outil de coupe en plusieurs outils élémentaires, tel qu'illustré à la Figure 1-7. Ainsi, une fraise cylindrique avec un angle d'hélice non nul se décompose suivant son axe comme un empilement d'outils sous forme de disques minces avec des arêtes de coupe très petites. Le but de cette subdivision est de considérer l'angle d'hélice nul pour chaque arête élémentaire sur le disque pour pouvoir appliquer les lois de coupe simplifiées du fraisage orthogonal. L'effort est la somme de tous les efforts élémentaires appliqués aux disques. Le modèle de calcul de la déformation de l'outil est basé sur le calcul du fléchissement d'une poutre cylindrique encastrée soumise à un effort de flexion. La variation de la déformation avec l'avance est généralement négligée comme dans l'équation du modèle proposé par Kline et al.[18] :

$$d_y(z) = \frac{F_y}{6EI_y} [(CFY - Z)^3 - (L - Z)^3 - 3(L - Z)^2(L - CFY)] \quad (1-2)$$

avec

$d_y(z)$:déformation correspondant à la position Z sur l'axe de l'outil;

F_y : effort dans la direction radiale de l'outil;

CFY : localise le point d'application de la force;

L, I_y : longueur et moment d'inertie de l'outil respectivement.

Fléchissement de la pièce

Si la pièce présente une faible rigidité, sa déformation sous l'effort de coupe peut être significative ce qui conduit à empêcher l'outil d'enlever la quantité de matière prévue, produisant ainsi une imprécision sur la surface finie. Une large gamme de pièces mécaniques de faible rigidité sont utilisées dans différents industries, comme l'aérospatiale et l'automobile, et nécessitent une optimisation du processus de fabrication sous contraintes de précisions.

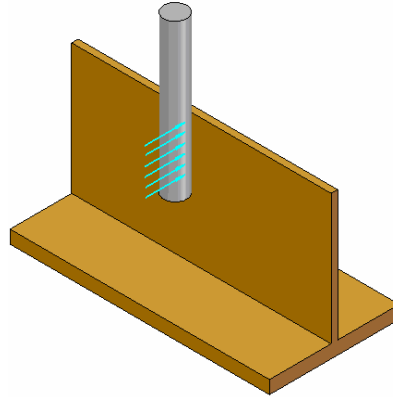


Figure 1-8. Répartition uniforme de l'effort de coupe sur la zone de contact pour prédire approximativement la déformation [19]

La prédiction de la déformation sous l'effort de coupe nécessite des approximations pour pouvoir établir des modèles de calcul. Comme illustrée à la Figure 1-8, une répartition uniforme de la force est supposée. La déformation prédite sera compensée par la modification de trajectoire. Mais le phénomène de couplage entre effort et déflexion nécessite d'autres approches plus complexes et lourdes comme celle proposée par Ratchev et al. [20] qui est basée sur:

- la prédiction de l'effort de coupe par un modèle dit 'flexible' [21];
- la prédiction de la déformation de la pièce utilisant les outils de calcul par éléments finis et l'effort prédit;
- la correction de la trajectoire pour compenser l'erreur prédite résultant du fléchissement de la pièce.

1.1.4 Stratégies de compensation et d'élimination des erreurs

La compensation est la procédure d'élimination de l'effet de l'erreur systématique dont le but est d'éliminer le défaut résultant sur pièce usinée. Les principales sources d'erreurs visées par l'étude et la compensation sont [22] les erreurs géométrique, thermique et l'erreur produite durant le processus de coupe. La présente étude traite la compensation des erreurs produites durant le processus d'usinage. Avant de mettre en œuvre une procédure de compensation, l'élimination des erreurs est considérée. Cette procédure améliore l'outil de fabrication pour supprimer l'erreur depuis la source [23].

- La compensation des erreurs géométriques des machines-outils consiste à ajuster la position de l'outil par rapport à la pièce. Elle fait l'objet de multitude de recherches [24] et s'effectue entre autres par la programmation de la machine-outil. L'erreur étant prévisible, la correction est apportée au mouvement des différents éléments de la machine pour anticiper cette erreur. Le code G initial contenant la commande de la trajectoire peut être ajusté pour générer un nouveau code compensé [25]. Cependant, l'efficacité de la compensation dépend essentiellement de la bonne prédiction de l'erreur. Les techniques de compensation sont [26] :

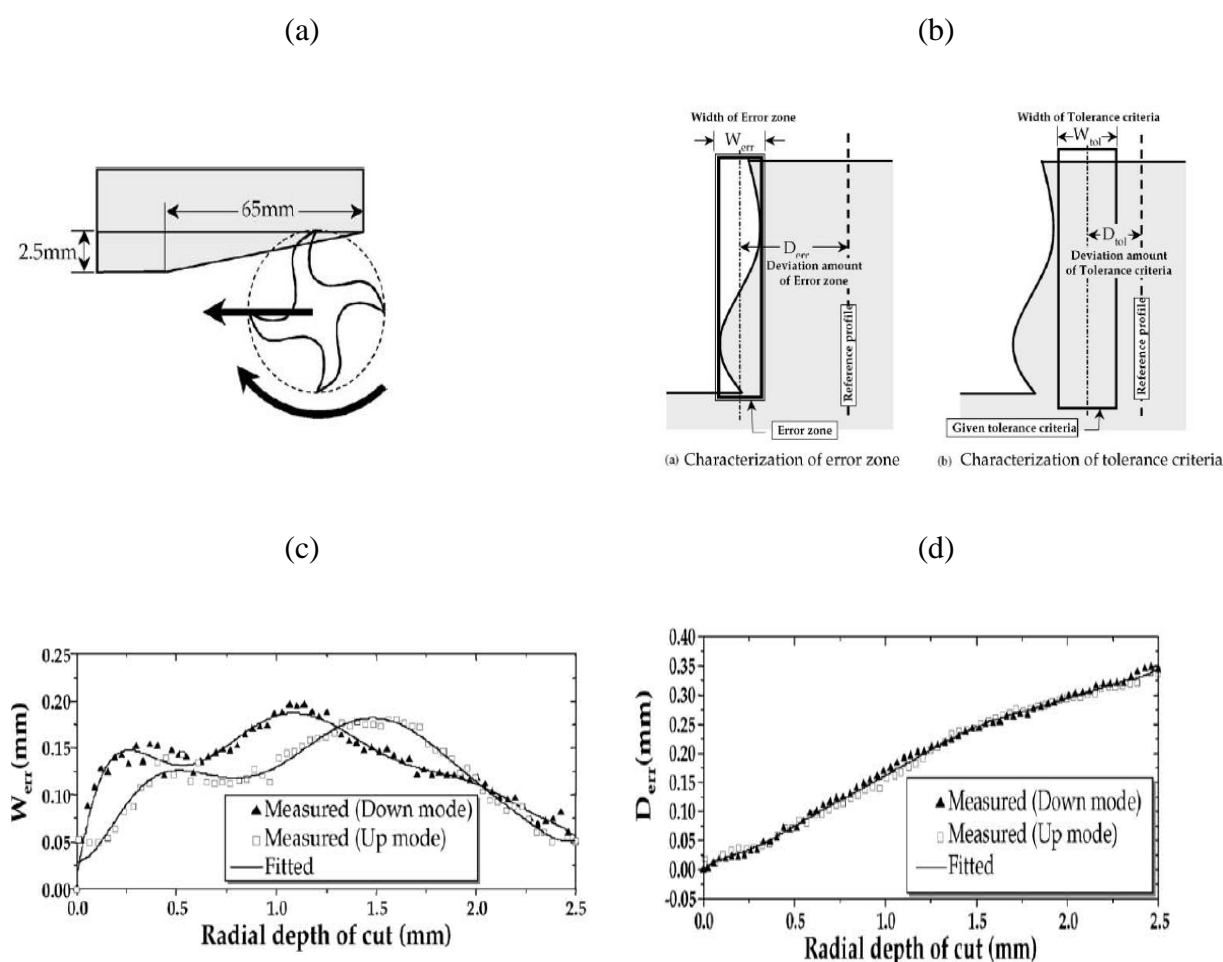


Figure 1-9. Méthode de compensation de Cho et al. : a) Usinage avec profondeur radiale de coupe variable, b) Définition des paramètres de tolérance et d'erreur, c-d) Base de donnée des paramètre d'erreurs en fonction de la profondeur de coupe [27].

- La compensation en temps réel du point interpolé le long de la trajectoire. La commande des axes est ajustée par le modèle d'erreurs intégré à l'armoire de commande;
- La compensation de la déviation cartésienne résultante au bout d'outil. Les erreurs géométriques de la machine restent présentes et le contrôleur effectue le positionnement articulaire pour assurer la position cartésienne compensée;

Comme l'erreur peut dépendre de la position sur chaque axe, Chen et al. [10] propose un schéma récursif de compensation. L'idée de cette procédure est que la position actuelle x_a de l'outil s'exprime en fonction de x_d et l'erreur $e(x_d)$ tel que : $x_a = x_d + e(x_d)$.

La commande, $x_c = x_d - e(x_d)$, pour anticiper $e(x_d)$ s'avère insuffisante mathématiquement. la position actuelle devient : $x_a = x_c + e(x_c) = x_d - e(x_d) + e(x_d - e(x_d))$ mais pratiquement les petits écarts de positionnement sont négligés : $e(x_d - e(x_d)) \approx e(x_d)$.

L'effet du fléchissement de l'outil de coupe a été étudié par Cho et al. [27]. Ils proposent une méthode de compensation d'erreur d'usinage utilisant une base de données d'inspection sur machine-outils de surface usinée. Ils caractérisent d'abord les erreurs géométriques ainsi que les erreurs de mesure sur machine-outils; ces erreurs ne dépendent pas du processus d'usinage et doivent être compensées séparément. L'erreur d'usinage dépendant de la profondeur de coupe est caractérisée par deux paramètres : L'intervalle de variation de l'erreur W_{err} et une cote D_{err} localisant cet intervalle d'erreur par rapport à la référence. La surface à usiner est caractérisée par deux paramètres : l'intervalle de tolérance W_{tol} et une cote D_{tol} définissant la surface à usiner par rapport à une référence. Les Figure 1-9-a et b montrent l'opération d'usinage et les quatre paramètres définissant la surface à usiner. Cho et al. expriment les deux paramètres W_{err} et D_{err} en fonction de la profondeur radiale de coupe R_D par deux relations empiriques, tout en gardant les autres paramètres de coupe inchangés (vitesse de coupe, d'avance et profondeur axiale de coupe). Comme le montre les Figure 1-9-c et d, pour établir ces relations, ils varient la profondeur radiale de coupe et enregistrent W_{err} et D_{err} .

La méthodologie de compensation de Cho et al. est basée sur des relations expérimentale en variant la profondeur de coupe. Une correction de la trajectoire d'outil peut être estimée à partir de ces bases de données. Selon Cho et al., l'efficacité de cette méthode exige que la source

principale de l'erreur soit la déflexion de l'outil de coupe. La déflexion de la pièce peut dépendre aussi de la position le long du profil qui n'est pas considérée dans cette procédure.

La compensation de l'erreur causée par le fléchissement d'une barre cylindrique en tournage est étudiée par Kops [28] où la profondeur de coupe nominale dépend linéairement du fléchissement. Ceci permet de calculer la profondeur de coupe à programmer pour anticiper la déflexion. Le calcul du fléchissement de la barre est basé sur des modèles empiriques. La profondeur de coupe actuelle est considérée comme étant la différence entre la profondeur nominale et le fléchissement.

1.2 Amélioration de la précision par l'usinage, l'inspection et la compensation en boucle fermée

1.2.1 Stratégies de compensation

La technique de compensation des erreurs en exploitant les résultats d'inspection et de contrôle de la pièce semi-finie ou finie est une stratégie visant la réduction des défauts de fabrication en ajustant la trajectoire de l'outil de coupe. L'amplitude et la direction de la correction dépendent essentiellement des défauts mesurés précédemment sur la pièce. Le recours à l'annulation du défaut de fabrication de la pièce en utilisant le défauts mesuré précédemment est due à la complexité d'agir sur la source de l'erreur. Le défaut sur la pièce résulte de la combinaison de plusieurs erreurs élémentaires.

Lo et Hsiao [29] proposent une procédure de compensation basée sur l'inspection de la pièce finie sur une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). L'erreur ou le défaut de fabrication est la différence entre le profil nominal et celui mesuré. La compensation s'effectue, pour la prochaine pièce, par le décalage symétrique du profil actuel par rapport au profil nominal pour calculer le profil compensé permettant de générer la trajectoire compensée. Ce processus, illustré à la Figure 1-10, est basé sur la technique dite '*de miroir*' et se répète jusqu'à l'obtention d'une précision acceptable. Cette méthode s'applique efficacement dans le cas de la production en série et sous l'hypothèse de la répétabilité de l'erreur [30-32]. Le démontage de la pièce de la machine-outil, le transport, l'inspection sur MMT dans des conditions différentes à celles d'usinage et la perte des références pièce compliquent l'identification de l'erreur réelle d'usinage.

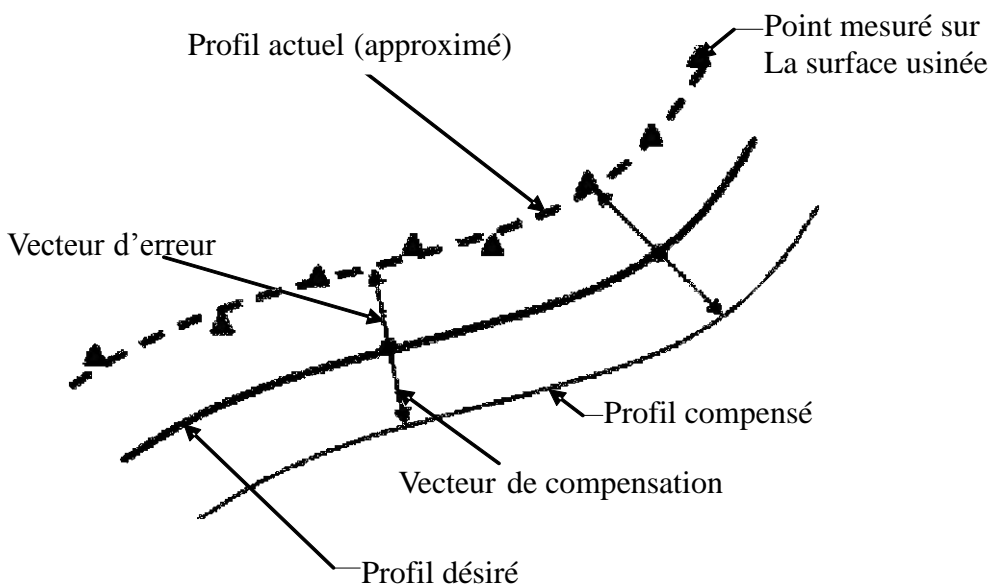


Figure 1-10. Compensation par la technique de miroir adapté à partir de [29]

Il est possible d'appliquer la compensation d'erreur pour la pièce inspectée elle-même. En utilisant la mesure sur machine-outils (MMO), le palpeur vient remplacer l'outil de coupe pour inspecté immédiatement la surface produite par l'opération de coupe effectué précédemment. Cette inspection peut être effectuée après les phases de semi-finition. Le résultat d'inspection sert à calculer la correction de la trajectoire en finition. Cette alternative de compensation s'appelle la compensation par le processus intermittent d'inspection. L'inspection et l'usinage s'effectue en alternance. L'avantage est que la pièce reste sous le même montage et l'inspection ne demande pas de procédures supplémentaires de préparation avant la mesure. Cette technique de mesure peut réduire considérablement le coût d'inspection [33].

Pfeifer [34] a implémenté la mesure sur machines-outils en 1980. Il mesure, sur tailleuse d'engrenage, de grandes roues dentées directement après usinage. Pfeifer mentionne que la mesure sur machines-outils mérite plus d'attention en recherche.

Compte tenu de la diversité des sources d'erreurs affectant la précision de la pièce citées précédemment, l'inspection sur machine-outils, en utilisant un palpeur remplaçant l'outil de coupe, peut détecter seulement les erreurs produites au cours de l'usinage et ne peut pas détecter les erreurs présentes à vide car l'outil de coupe et le palpeur suivent alors le même trajet erroné

[31]. Les erreurs de la machine doivent être étudiées et compensées séparément [32, 34]. L'erreur mesurée directement après la coupe par la machine-outils est due principalement à la déformation sous l'effort de coupe [31, 35, 36] et à un biais, causé par l'outil de coupe [31].

1.2.2 Implémentation de la compensation

Les profils nominaux à usiner sont généralement constitués d'éléments géométriques de base comme le segment de droite, l'arc de cercle et peut contenir aussi des profils gauches. La compensation de la trajectoire requiert l'ajustement géométrique de ces formes. Cette procédure fait perdre la forme standard de l'élément géométrique par l'ajustement. Le passage à la nouvelle forme compensée nécessite des outils mathématiques d'approximations et de conversion. L'objectif est de réduire l'écart entre la forme nominale désirée et celle obtenue après usinage en suivant la trajectoire compensée.

Pour une trajectoire d'outil construite par des segments de droite et des arcs de cercle, Suh et al. [37] proposent de convertir la trajectoire nominale en une succession de segments de droite de nombre minimal permettant le respect d'une tolérance donnée. La compensation est effectuée pour chaque position [29] pour produire la trajectoire totale compensée.

Bandy et al. [31] utilisent des fonctions spline cubique pour interpoler les points compensés. Ces fonctions viennent remplacer les formes géométriques nominales qui constituent initialement le profil de la pièce. Un nombre minimal de points mesurés est nécessaire pour reproduire un arc de cercle par cette méthode.

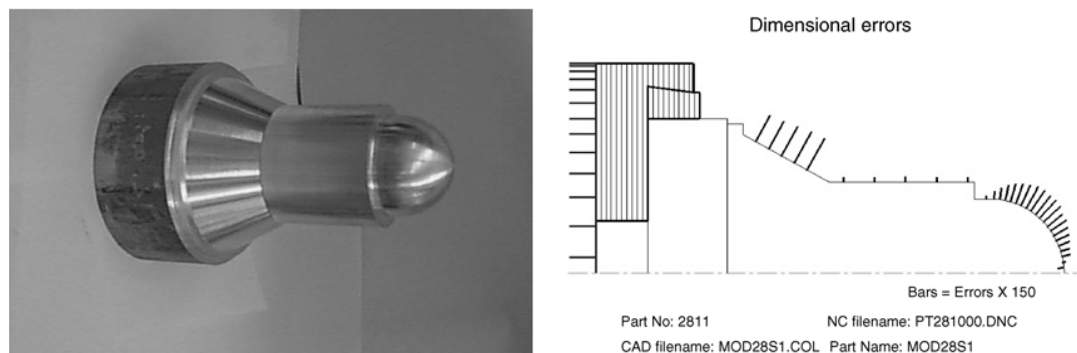


Figure 1-11. Gauche, pièce test. Droite, la répartition de l'erreur d'usinage après semi finition [38].

Les nouveaux profils interpolés peuvent avoir de discontinuité entre eux. Comme montré à la Figure 1-11, la géométrie désirée de la pièce test est construite d'arc et de segments de droite. Les trajectoires compensées sont calculées et connectées sous la condition de la continuité géométrique et des conditions aux limites [38].

1.2.3 Erreur de mesure sur machine-outil

La comparaison des données d'inspection obtenues par mesure sur machine-outils avec les données prévues nominalement ne donne pas seulement les défauts de fabrication de la pièce, mais se trouve aussi affectée par une erreur de mesure qui fait l'objet de plusieurs recherche [39].

Les principaux facteurs de l'erreur de palpement sont [39] :

1. l'environnement (température);
2. la structure du palpeur : rigidité et longueur du stylet et le rayon de la touche du stylet;
3. le mouvement de palpement : vitesse et direction d'approche et l'impact de l'effort de contact;
4. la pièce à palper incluant la forme et le matériau;
5. le nombre et la répartition des points de mesures.

Par exemple, si la vitesse d'approche est grande, il en résulte un grand effort transmis et donc peut produire une déflexion importante du stylet [39]. Par conséquent, la précision de l'acquisition de la position peut être affectée.

1.3 Modèles de compensation basés sur les NURBS

1.3.1 Définition et utilisation des NURBS

Non Uniform Rational B-Spline (NURBS) est un modèle mathématique largement utilisé dans la modélisation et la représentation des courbes et surfaces utilisées dans la conception et la fabrication assistée par ordinateur. Il peut représenter les formes géométriques connues ainsi que les formes libres. Un avantage crucial pour l'utilisation de ce modèle dans la fabrication est la reconstruction précise des surfaces à partir des points mesurés [40]. Les NURBS offre la possibilité de manipuler facilement les courbes et les surfaces comme l'ajustement local ou global tout en gardant la même formulation mathématique représentant l'objet. Seul l'ajustement

de certains paramètres comme les points de contrôle permet d'apporter les ajustements voulus [41, 42]. Une courbe NURBS $C(u)$ est une courbe paramétrique définie comme suit [42]:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (1-3)$$

où $C(u) = [x(u) \ y(u) \ z(u)]$ représente les coordonnées d'un point de la courbe, u est un paramètre, P_i un point de contrôle, w_i est le poids associé au point de contrôle P_i et $N_{i,p}$ fonction paramétrique de B-Spline de degré p . La définition détaillée de $N_{i,p}$ peut être consultée à la réf. [43]. Pour une répartition égale des poids des points de contrôle, la courbe NURBS se simplifie en une B-Spline. Ce modèle de représentation de courbes et de surfaces peut être utilisé directement par certains contrôleurs de machine-outils.

1.3.2 Compensation de la trajectoire d'outil par l'ajustement des courbes NURBS

Etant donné que la compensation fait perdre la forme standard du profil, le recours à la conversion et à l'ajustement de la trajectoire sous forme NURBS est un moyen de passage du modèle nominal vers le modèle compensé.

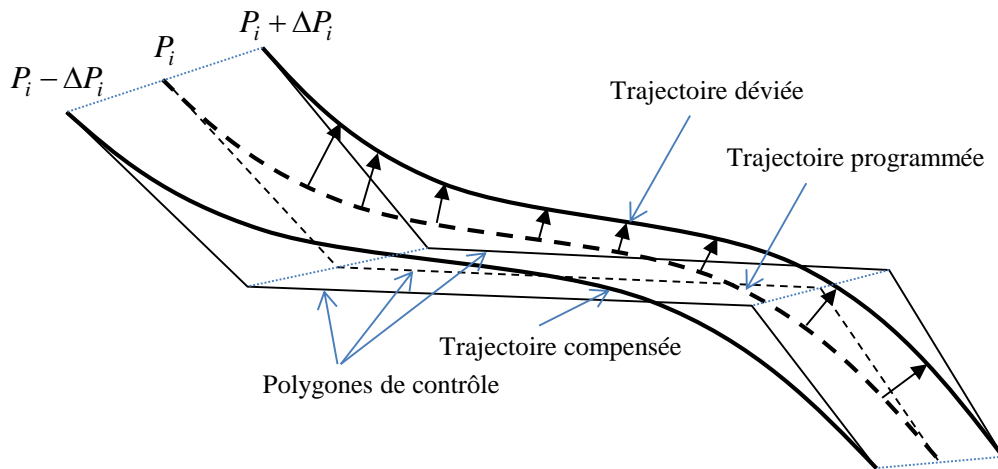


Figure 1-12. Concept de la méthode de compensation de l'erreur géométrique de Lei et Sung, adaptée à partir de [42].

Lei et Sung [42] proposent une approche pour compenser la trajectoire d'outil, représentée par NURBS, seulement par l'ajustement des points de contrôle de la courbe. Initialement, la trajectoire est composée d'un grand nombre d'incrément linéaires. Sous forme NURBS, quelques points de contrôle (pôles) sont nécessaires pour générer la nouvelle trajectoire compensée. La Figure 1-12 montre le concept de la méthode de Lei et Sung. La trajectoire commandée $C(u)$ est contrôlée par les points P_n . En principe, pour compenser l'erreur géométrique, chaque point de la courbe $C(u)$ doit être compensé en injectant ses coordonnées dans le modèle d'erreur pour calculer l'erreur $e(u)$ correspondante. Ensuite, la trajectoire déviée $C_e(u)$ est l'ensemble de points $C_e(u) = C(u) + e(u)$. La trajectoire compensée est l'ensemble des points $C_c(u) = C(u) - e(u)$. Cependant, Lei et Sung, pour simplifier, assument qu'une trajectoire déviée $C'_e(u)$ peut être obtenue directement à partir de la trajectoire nominale en ajustant les points de contrôle par le modèle d'erreur tel que $C'_e(u) : P_n \rightarrow P_n + \Delta P_n$. Les déviations des points de contrôles obtenues ΔP_n sont soustraites des points de contrôle initiaux pour produire la trajectoire compensée tel que $C'_e(u) : P_n \rightarrow P_n + \Delta P_n$.

Comme montré à la Figure 1-12, les points de contrôle n'appartiennent pas à la courbe. Injecter les points de contrôle dans le modèle d'erreur pour en déduire l'erreur sur la courbe est moins précis et dépend du comportement de l'erreur dans l'espace de la machine-outils. Si par exemple l'erreur est fonction linéaire de la position, $e(u) = a + b C(u)$, on peut déduire l'erreur d'un point sur la courbe à partir de l'erreur à n'importe quel point dans l'espace de la machine. Sinon, cette déduction n'est pas parfaite.

Elmaraghy et al. [41] compensent les erreurs quasi statiques de la machine-outil en utilisant les NURBS. La surface nominale représentée par NURBS subit une transformation pour devenir la surface déviée selon le modèle de comportement d'erreur de la machine-outils. Cette transformation est composée de deux transformations : la première est une transformation homogène (rotations + translations) en considérant que la géométrie est rigide. La deuxième est une distorsion de la géométrie. Cette dernière est négligée pour une linéarisation de la procédure. Alors, un opérateur linéaire, pour une machine-outils donnée, permet de relier la géométrie nominale avec celle déviée. Le principe de la compensation d'Elmaraghy et al. Consiste à repositionner et réorienter la géométrie à usiner pour minimiser l'erreur résultante.

La différence entre les deux méthodes (Lei et Sung et Elmaraghy et al.) est que la première compense l'erreur totale mais calculée aux points de contrôle de la courbe qui n'appartiennent pas à la courbe. Ensuite la compensation est déduite pour la courbe. La précision de la compensation dépend du comportement de l'erreur. La deuxième méthode néglige la partie de l'erreur causant une déformation de la géométrie. Elle compense seulement l'erreur produisant une transformation homogène de la surface qui subira seulement une relocalisation et pas de distorsion.

La compensation peut être effectuée pour un nombre limitée de point sur une courbe NURBS produisant un tableau de compensation qui peut être utilisée directement en ligne pour calculer la correction de la trajectoire [44].

CHAPITRE 2 ORGANISATION GÉNÉRALE

Après l'introduction et la définition des objectifs, le chapitre 1 dresse une recherche bibliographique sur les types d'erreurs affectant la précision d'usinage comme les erreurs de la machine-outils et les erreurs du processus d'usinage. Des travaux antérieurs concernant les méthodes de réduction des erreurs d'usinage par la coupe, l'inspection et la compensation sont présentés. L'utilisation des modèles B-Spline et NURBS dans la compensation des erreurs est revue. Les chapitres suivants précèdent la conclusion et les annexes et présentent ce qui suit :

3. Article 1;
4. Article 2;
5. Discussion générale;
6. Contribution.

Le présent chapitre (chapitre 2) discute l'organisation générale de cette thèse. La contribution de chaque article est discutée. L'intégrité de cette thèse ainsi que les liens entre les deux articles qui constituent le corps de cette thèse sont présentés.

Le chapitre 3 présente le premier article publié dans «CIRP Annals- Manufacturing Technology» intitulé : «Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing» (vol. 60, pp. 391-394, 2011). Il présente le modèle générale de l'erreur mesurée par palpée sur machine-outils. Le modèle développé est adapté pour représenter l'erreur d'une surface usinée en mode multi-passe avec inspection intermittente. Pour anticiper cette erreur, le modèle développé de compensation est basé sur le coefficient de la compliance de coupe. Ce coefficient défini dans cette thèse est identifié seulement à partir des données issues de la mesure sur machine-outils de la géométrie usinée. Le modèle dérivé pour le cas de trois-passe avec deux-passe inspectées est détaillé en effectuant une estimation de la compliance par extrapolation.

La validation expérimentale est faite pour deux types de géométrie, une linéaire et l'autre circulaire. Le choix des géométries rectiligne et circulaire de compliance variable a permis

d'obtenir des résultats impressionnants qui appuient bien la formulation mathématique proposée pour la modélisation de l'erreur ainsi que pour sa compensation.

Le chapitre 4 présente l'article en cours de publication intitulé « Closed door machining-Error compensation of complex surfaces using the cutting compliance coefficient and on-machine measurement ». Cet article décrit la deuxième partie des travaux planifiée pour cette thèse. Étant donné que la compensation, calculée par le modèle développé dans le premier article, est discontinue et valide seulement aux points où les mesures sont prises, une stratégie de génération de la trajectoire compensée et continue de l'outil de coupe s'avère indispensable.

Une technique de déformation de B-Spline est développée pour pouvoir produire la trajectoire compensée à partir de la trajectoire nominale et un ensemble de vecteurs de compensations pour un nombre limité de points. Les vecteurs de compensation sont calculés par le modèle d'erreur. La trajectoire nominale à compenser est convertie en B-Spline avec une précision contrôlable. Le modèle de conversion est basé sur les moindres carrés estimant les positions des points de contrôle à partir d'une succession de positions de l'outil de coupe. Les vecteurs de compensations sont repartis le long de la courbe et un ajustement est produit pour toutes les positions de l'outil. La courbe B-Spline compensée s'obtient selon le même processus de minimisation des moindres carrés utilisé pour produire la courbe nominale. L'écart à minimiser est celle entre les points ajustés et la courbe B-Spline compensée. Comme les B-Spline et NURBS sont des modèles reconnus par certains contrôleurs de machine-outils, un ajustement des points de contrôle de courbe nominale permet de compenser toute la courbe, ce qui facilitera l'industrialisation de la procédure de compensation.

Pour la vérification expérimentale, une pièce en aluminium est usinée. La forme de la géométrie générée est comparable à un profil aérodynamique. Cette géométrie est convertie en B-Spline et le processus de compensation est appliqué. La méthode de séparation des composantes de l'erreur est appliquée en programmant un dégagement tangentiel de l'outil de coupe créant une réduction à zéro de la profondeur de coupe nominale.

Les résultats montrent que la précision d'usinage, évaluée à partir de la machine-outil, de cette pièce est améliorée grâce à la modification de la trajectoire par déformation de courbe B-Spline.

Les travaux présentés à trois conférences, mis en annexes A B et C, sont des résultats des travaux effectués dans le cadre du développement des deux articles de revue.

En Annexe A, une simplification de l'estimation de l'erreur de l'offset de l'outil de coupe est présentée. À partir de deux points mesurés, une estimation linéaire est proposée pour éviter l'estimation à une profondeur de coupe nulle qui peut produire un comportement qui ne respecte pas les conditions de coupe requises comme le copeau minimum possible. Une comparaison entre la mesure sur machine-outil et sur CMM est effectuée pour vérifier la précision relative de mesure de la machine-outil.

À l'annexe B, un test multi-passe est présenté pour montrer l'évolution de l'erreur en mode multi-passe qui peut être expliqué par la perte de rigidité de la pièce à cause de l'enlèvement de la matière. Un autre objectif de cet article était la vérification de la reproductibilité de l'erreur dans des conditions similaires comme la production en grande quantité. Le résultat montre que l'erreur mesurée sur machine-outils peut être reproductible. Ce fait encourage, pour des raisons de productivité, à omettre la mesure systématique pour toutes les pièces en production de masse. L'annexe C présente la procédure de déformation de la trajectoire d'outil par déformation de B-Spline. Le résultat expérimental montre que la courbe compensée (B-Spline) passe pratiquement par les points compensée. Ce qui permet de réduire significativement l'erreur d'usinage.

CHAPITRE 3 PREDICTIVE COMPLIANCE BASED MODEL FOR COMPENSATION IN MULTI-PASS MILLING BY ON-MACHINE PROBING

R. Guiassa and J.R.R. Mayer*

* Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, P.O. Box 6079,
Station Downtown, H3C 3A7 Montréal (QC), Canada

Submitted by Lucjan Kops (1), Montréal, Canada

Published in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 391-394, 2011.

3.1 Abstract

Process-intermittent gauging by on-machine probing detects errors due to the cutting action such as system deflection. Milled thin wall parts are particularly affected. A general model is presented which relies solely on probing data from semi-finishing cuts to compensate the final cut. A variable cutting compliance coefficient relates the total system deflection to the depth of cut. The effect of both changes in final depth of cut and the reduction in part compliance are anticipated by the model based approach in order to more effectively compensate the final cut. Experimental validations for the milling of a straight thin wall and for a hole with variable wall thickness show that the compliance induced error is essentially eliminated using the proposed model compared to only 60 % for a non-compliance based approach.

Keywords: Milling, Compensation, On-machine probing

3.2 Introduction

The deformation of the machine-workpiece-tool system under the action of cutting forces affects the work accuracy generally by leaving uncut material on the machined surface. To address this problem much research is conducted to develop and calibrate machine and process models and then simulate and predict the effect on the part [1]. An alternative to prediction is actual measurement using on machine measurement (OMM) and process-intermittent probing (PIP) [2, 3]. The metrology can be used not only for part inspection but also to give information about the cutting process [4]. By inspecting the part before the finishing cut, corrective actions can be taken at the finishing cut for the same part. PIP cannot detect errors which occur both during probing and during machining. The error detected by PIP is dominated by that due to tool offset error and to deflection [2]. In order to compensate such errors, a mirror approach was proposed which consists in adding this error, detected after the semi-finishing cut, to the tool path in the finishing cut, thus assuming that the error would remain the same. While this approach gives good results, its efficiency is limited because total deflection depends on the real cutting depth which may vary between the semi-finishing and finishing cut [5, 6]. In this paper, a compliance based model is proposed to compute the finishing cut correction through process-intermittent probing feedback. The deflection induced error is treated using a compliance model, enriched by the possible change in compliance due to material removal, while the tool offset error is cancelled using the mirror approach.

First, a general multi-pass and multi-inspection process model is presented. Secondly, a simplified three-pass process is derived from the model. Then, experimental validations are presented for straight and circular thin walls of variable thickness and a conclusion follows.

3.3 Machining error model

The machining error, detected using PIP, is assumed caused by the cutting tool geometry error and the total system deflection. Tool wear, eccentricity, runout of the cutting tool, and in some cases chatter [7] cause an offset error, ε_{to} , which is here considered constant along the machined surface. The deflection causes an error, ε_r , which varies according to the system stiffness and the machining forces at each instantaneous tool position along the machined profile [8, 9]. The machining error is obtained by comparing the actual geometry with the programmed geometry

taken from the cutter location file. A Non Uniform Rational B-Spline curve (NURBS) is used to convert the programmed profile into a parametric curve $P(u)$. The measured profile, taken as the actual profile, $P_a(u)$, is obtained from $P(u)$ and the measured points, by adjusting the control points of $P(u)$ according to ref. [10], in a least square sense. The total undesired deflection is the sum of the workpiece (w), machine (m) and tool (t) deflections. The deflection magnitude of each one depends on its stiffness and so the system can be modeled as the deflection of a series of springs, shown in Figure 3-1, where the deflection is calculated along the tool path normal direction. The elastic deflection of the system, under the action of cutting forces, F , results in uncut material from the machined surface [11]. It is characterized by the resulting displacement, ε_r , of all springs as:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rw} + \varepsilon_{rm} + \varepsilon_{rt} \quad (3-1)$$

Introducing Hooke's law of elasticity for springs mounted in series:

$$\varepsilon_r = \frac{F}{K_w} + \frac{F}{K_m} + \frac{F}{K_t} = \frac{F}{K_e} = S_e \cdot F \quad (3-2)$$

where K_e and S_e are the system equivalent stiffness and compliance factors respectively. So, the system is modeled by a single equivalent spring, with compliance S_e . The force, F , is a function of the cutting parameters including the cutting speed, s , the feed rate, f , the real cutting depth, d , and the cutting tool geometry. Assuming that s , f and the tool are kept constant, F can be approximated as:

$$F = K_c \cdot d \quad (3-3)$$

where K_c is the cutting coefficient. Substituting eq. (3-3) into eq. (3-2) yields:

$$\varepsilon_r = S_e \cdot K_c \cdot d = \rho \cdot d \quad (3-4)$$

where ρ is the cutting compliance coefficient. Eq. (3-4) provides a linear relation between the total system deflection and the real cutting depth [12]. Using process-intermittent probing, the deviation, ε , of the measured profile compared to the programmed one can now be written as:

$$\varepsilon(u) = \varepsilon_{io} + \varepsilon_r(u) = \varepsilon_{io} + \rho(u) \cdot d(u) \quad (3-5)$$

The offset error, ε_{to} , is the difference between the effective, ϕ_{to} , and the nominal tool diameter. It is assumed the same for the semi-finishing and the finishing cuts and not affected by the cutting forces. In general, the system stiffness may vary along the path; specific ρ and d are required for each position identified by the parameter u along the machined profile.

3.4 Machining error compensation model

3.4.1 Cutting compliance approach

The machining error compensation model is based on an error anticipation process, illustrated in Figure 3-2. The new required finishing cut, d_f , is the nominal value, d_{nf} , plus the measured (probed) deviation, ε , from previous operations:

$$d_f = d_{nf} + \varepsilon \quad (3-6)$$

Using eq. (3-4), the deflection, ε_{rf} , resulting from the cut, d_f , can be estimated as:

$$\varepsilon_{rf} = \rho_f \cdot d_f \quad (3-7)$$

So, the command (or programmed) finishing cut, d_{pf} , is the nominal final cut, d_{nf} , compensated for both the anticipated deflection, ε_{rf} , and the tool offset, ε_{to} . So,

$$d_{pf} = d_{nf} + C \quad (3-8)$$

where

$$C = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{rf} \quad (3-9)$$

is the compensation.

Case of $\rho_f = \rho_s$

Assuming that the workpiece compliance (and so the total system compliance) is the same for the final cut, ρ_f as during the semi-finishing cut, ρ_s , we can write from eq. (3-4):

$$\rho_f \cong \rho_s = \frac{\varepsilon_s}{d_s} \quad (3-10)$$

which substituted in eq. (3-7) yields:

$$\varepsilon_{rf} \cong \frac{\varepsilon_s}{d_s} \cdot d_f = \mu \cdot \varepsilon_s \quad (3-11)$$

where $\mu = d_f / d_s$ is the depth ratio. So, the final command (or programmed) depth of cut can be written as follows:

$$d_{pf} = d_{nf} + \varepsilon_{to} + \mu \cdot \varepsilon_s, \text{ where } (\varepsilon_{to} + \mu \cdot \varepsilon_s) \text{ is the required compensation } C.$$

3.4.2 General model

In general, the cutting compliance coefficient is expected to be affected by the material removal, especially in the case of aerospace mechanical components with thin walls and aggressive high speed cuts. In order to accurately estimate ρ_f , a machining process with a multiple passes [13] intermittently inspected, shown in Figure 3- 3-Left, is performed. Figure 3-3-Right illustrates the trend of ρ . The i -th cut with nominal depth, d_{ni} , is planned to obtain the nominal dimension, D_{ni} . The actual dimension, D_i , is deviated from D_{ni} by the total machining error ε_i . d_i and ρ_i are the real cutting depth and cutting compliance coefficient respectively and are derived from PIP as follows:

$$d_i = d_{ni} + \varepsilon_{(i-1)} - \varepsilon_i \quad (3-12)$$

$$\rho_i = \frac{\varepsilon_{ri}}{d_i} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{to}}{d_i} \quad (3-13)$$

From eq. (3-12), at the last cut (finishing cut), the expected cut d_f is

$$d_f = d_{nf} + \varepsilon_{(f-1)} - \varepsilon_f \quad (3-14)$$

Since we wish for zero error after the finishing cut, then $\varepsilon_f \equiv 0$ and so

$$d_f = d_{nf} + \varepsilon_{(f-1)} \quad (3-15)$$

The expected deflection then is given by eq. (3-7) where ρ_f will be estimated using probed data from previous cuts and Lagrange polynomial classic formula as follows:

$$\rho_f = \sum_{j=1}^{f-1} \rho_j \cdot L_j \quad (3-16)$$

$$\text{where } L_j = \prod_{k=1, k \neq j}^{f-1} \frac{d_f^c - d_k^c}{d_j^c - d_k^c} \quad (3-17)$$

$$\text{and } d_f^c = \sum_{l=1}^i d_l \quad (3-18)$$

So, the deflection during the compensated (finishing) cut is formulated according to eq. (3-7) and the final command depth of cut is:

$$d_{pf} = d_{nf} + \varepsilon_{to} + \rho_f \cdot d_f \quad (3-19)$$

3.4.3 Compensation model through three cutting passes

The prediction of the compliance coefficient benefits from a maximum number of intermittent inspections. For three cutting passes ($f = 3$), the deflection during the last cut is predicted by substituting eq. (3-16) into eq. (3-7):

$$\varepsilon_{r3} = \left(\rho_1 \frac{d_3^c - d_2^c}{d_1^c - d_2^c} + \rho_2 \frac{d_3^c - d_1^c}{d_2^c - d_1^c} \right) \cdot d_3 \quad (3-20)$$

Replacing each cumulated depth by the corresponding expression (eq. 3-18), into eq. (3-20) and using eq. (3-4):

$$\varepsilon_{r3} = \mu \cdot \varepsilon_{r2} + \mu^2 (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) + \mu^2 \frac{d_1 - d_2}{d_1} \varepsilon_{r1} \quad (3-21)$$

where $\mu = d_f / d_s = d_3 / d_2$.

The prediction of the deflection induced error (eq. (3-21)) requires three inspection operations; before and after the first cut and after the second cut. In the case of $d_{n1} = d_{n2}$, the third term of eq. (3-21) can be written using eq. (3-12) as:

$$\mu^2 \frac{d_1 - d_2}{d_1} \varepsilon_{r1} = \mu^2 \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{d_1} \varepsilon_{r1}$$

As a product of errors, this term is small compared to the other terms in eq. (3-21) and can be neglected so finally

$$C \cong \varepsilon_{to} + \frac{d_{n3} + \varepsilon_2}{d_2} \varepsilon_{r2} + \left(\frac{d_{n3} + \varepsilon_2}{d_2} \right)^2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (3-22)$$

Hence, the inspection before the first cut becomes unnecessary because d_1 is removed from the model. As a result, ε_{to} , d_2 , ε_1 and ε_2 are identified by only two inspection operations under the condition $d_{n1} = d_{n2}$.

3.5 Experimental validation

Machining and OMM are carried out on a 5-axis machine tool, HURON model KX8 Five, using a helical milling cutter, (with 3 flutes and diameter of 19.05 mm HANITA Ref. FZ 4AN3 19007) and a touch trigger inspection probe (Renishaw MP700). Figure 3- 4 shows the test parts, mounted on the machine tool, and their geometries and dimensions. Both parts have variable compliance along the machined path. First, the change in cutting compliance coefficient is analyzed using a six pass cutting test on a linear part. Figure 3- 5 shows significant change at $x=125$ mm for equal successive programmed depth of cuts of 300 μm . This confirms that the cutting compliance coefficient can be affected by the material removal. Figure 3- 6 shows the form defect before and after compensation, for a nominal cutting depth of 150 μm . Figure 3- 6(a) shows results for the mirror approach. The form defect is reduced from 115 μm after the previous uncompensated semi-finishing cut to 45 μm after the finishing cut. It is about 40 % of the previous uncompensated error. This error was predicted by the compliance model, Figure 3- 6(a). Figure 3- 6(b) shows the form defect after the semi-finishing cuts (cut 1 and cut 2) and after the finishing cut which is compensated using the variable cutting compliance coefficient approach (cut 3). However, since cut 1 and cut 2 have similar defects, the compliance variation is not significant so the reduced model (eq. (3-11)) is sufficient to adjust the tool path of cut 3. The form defect is improved from 78 μm to ± 3 μm .

Figure 3- 7 shows the circular test: on the left, the design of the tool path and the depth; on the right, the form and the size defect before and after compensation. The nominal depth is 0.5 mm for each cut. The tool progressive entrance allows a zero programmed depth of cut at the profile end (90°). The transient tool path at the start and the end profile is chosen under condition of

geometric continuity. According to the proposed model, the machining error is assumed reduced to the tool offset error when the programmed depth is zero. So, from the uncompensated cuts $\varepsilon_{to} = 20 \text{ } \mu\text{m}$ ($d_n=0$). For the rigid areas (90 to 180) and (270 to 360°), the machining error is repeatable; the material removal does not affect the compliance coefficient evolution. However, in the low rigidity direction, (0 to 90) and (180 to 270°), the machining error is important compared to the error in the rigid directions. Furthermore, the machining error measured after the second cut is higher than the previous one probably due to increased compliance. After compensation using the derived model (eq. (3-22)), the form and the size of the circular profile is improved from $-60 \text{ } \mu\text{m}$ for the uncompensated cuts to $\pm 6 \text{ } \mu\text{m}$ after compensation.

3.6 Conclusion

In this paper, a variable cutting compliance coefficient model is developed to compensate the machining error resulting from deflection and the tool offset error, using solely data from process-intermittent probing. Experimental validation is carried out both on a linear and a circular feature. Results show significant improvements over the mirror approach. For the conditions selected, errors for the mirror and proposed approaches are, for the linear profile, $45 \text{ } \mu\text{m}$ and $3 \text{ } \mu\text{m}$ respectively. For the circular profile and using the proposed approach, the error is reduced from $78 \text{ } \mu\text{m}$ to $6 \text{ } \mu\text{m}$ before and after compensation respectively. Using the proposed compensation model, the accuracy is improved without restriction in the magnitude of the depth of cut which may decrease the total machining time.

3.7 References

- [1] Brecher, C., Esser, M., Witt, S., 2009, Interaction of manufacturing process and machine tool, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58/2:588-607.
- [2] Bandy, H. T., Donmez, M. A., Gilsinn, D. E., Han, C., Kennedy, M., Ling, A. V., Wilkin, N. D., Yee, K. W., 2001, A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 6811 pp 1-77.

- [3] ElMaraghy, H.A., Barari, A., Knopf, G.K., 2004, Integrated Inspection and Machining for Maximum Conformance to Design Tolerances, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53/1:411-416.
- [4] Kunzmann, H., Pfeifer, T., Schmitt, R., Schwenke, H., Weckenmann, A., 2005, Productive metrology-adding value to manufacture, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54/2:691-704.
- [5] Myeong-Woo, C., Tae-il, S., Hyuk-Dong, K., 2003, Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation, *Journal of Materials Processing Technology*, 136:88-99.
- [6] Kops, L., Gould, M., Mizrach, M., 1994, A search for equilibrium between workpiece deflection and depth of cut: Key to predictive compensation for deflection in turning, *Manufacturing Science and Engineering*, ASME PED-68/2:819-825.
- [7] Paris, H., Peigne, G., Mayer, R., 2004, Surface shape prediction in high speed milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44:1567-1576.
- [8] Hinduja, S.M.D., Burdekin, M., 2003, Assessment of force-induced errors in CNC turning, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52/1:329-332.
- [9] Liu, Z.Q., Venuvinod, P.K., 1999, Error compensation in CNC turning solely from dimensional measurements of previously machined parts, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48/1:429-432.
- [10] Lei, W.T., Sung, M.P., 2008, NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48:307-319.
- [11] Matsumoto, K., Hatamura, Y., Nakao, M., 2000, Actively Controlled Compliance Device for Machining Error Reduction, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 49/1:313-316.
- [12] Kops, L., Gould, M., Mizrach, M., 1993, Improved analysis of the workpiece accuracy in turning, based on the emerging diameter, *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 115:253-257.

- [13] Chen, W., Xue, J., Tang, D., Chen, H., Qu, S., 2009, Deformation prediction and error compensation in multilayer milling processes for thin-walled parts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49:859-864.

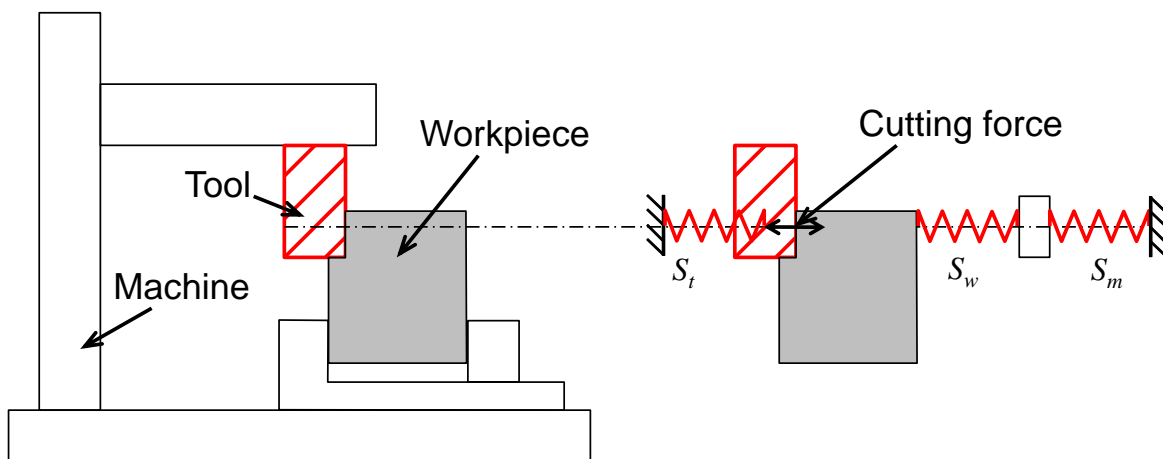


Figure 3-1. Equivalent model of the total system deflection

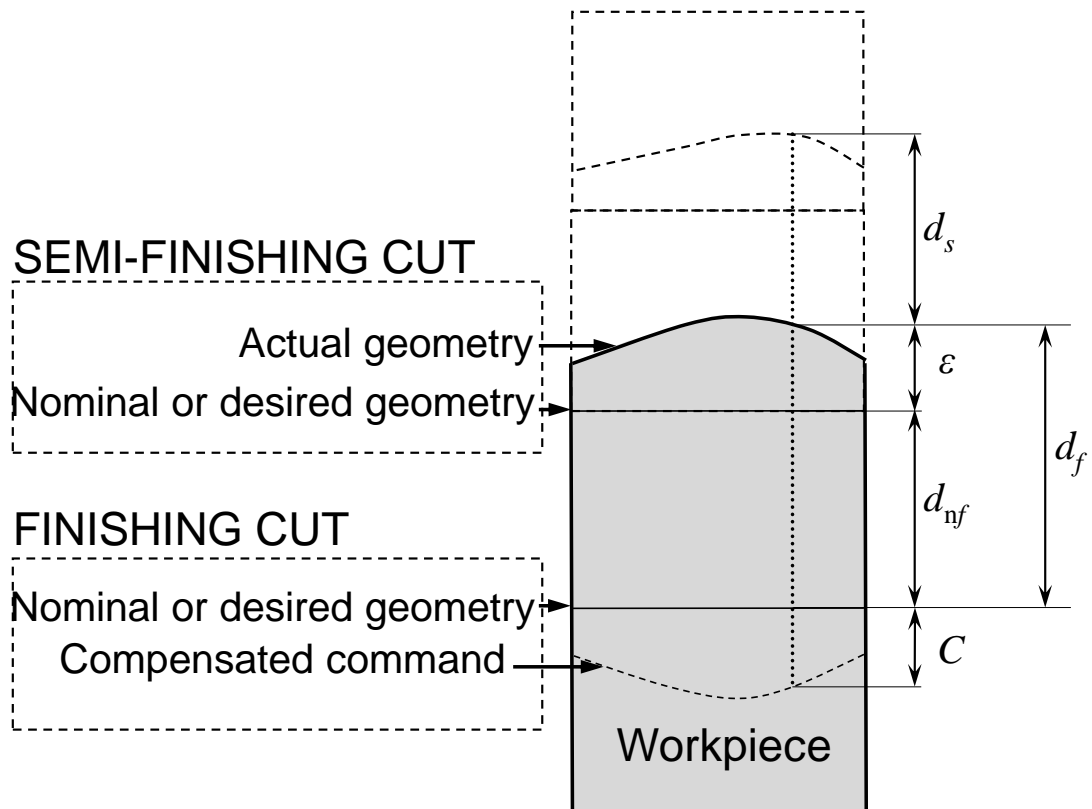


Figure 3-2 Compensation by error anticipation

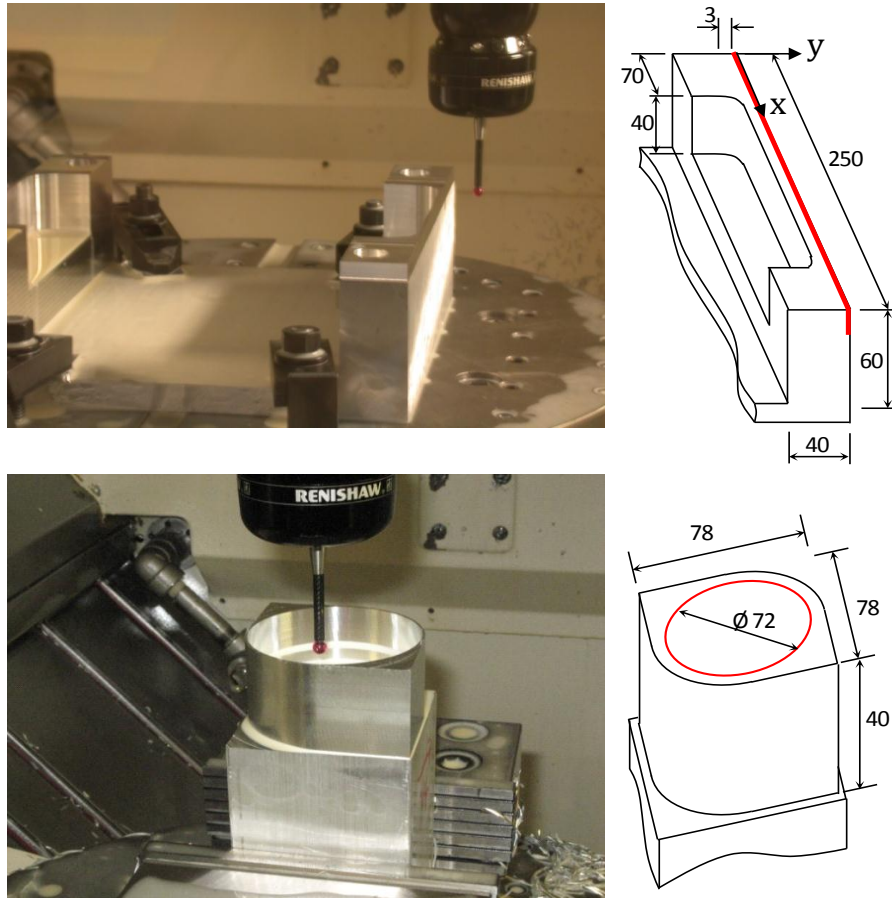


Figure 3-4 Test parts, made of aluminum, mounted on machine tool and their principal dimensions in mm.

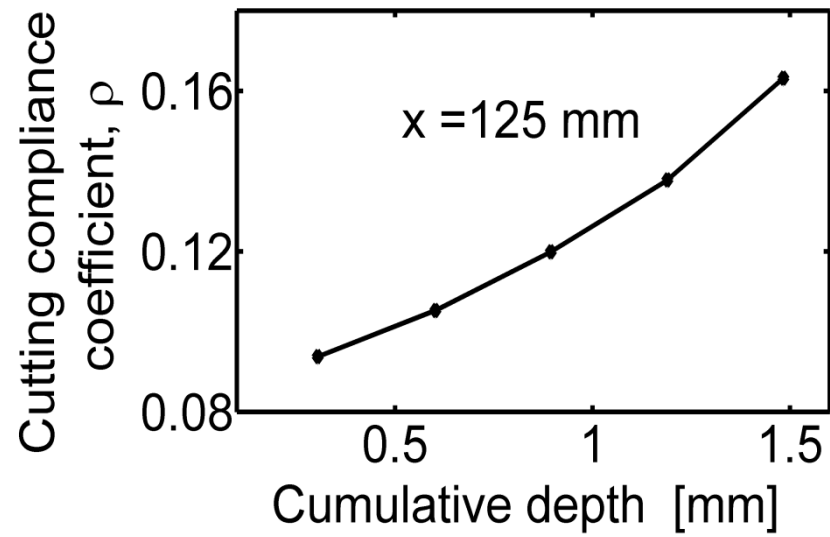
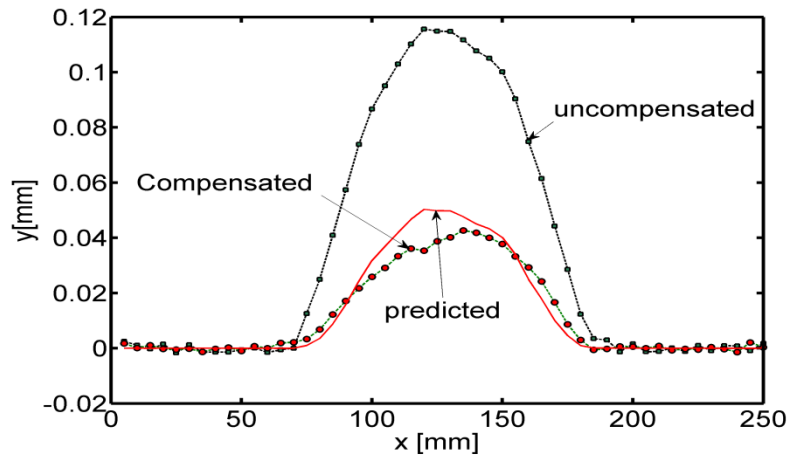
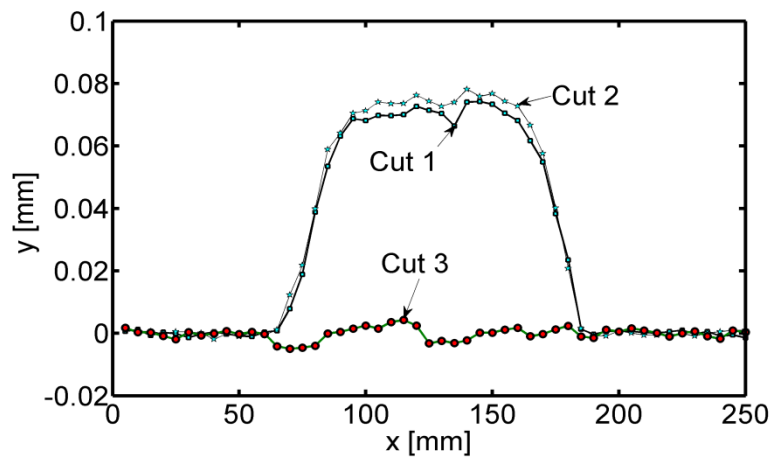


Figure 3-5 Evolution of the cutting compliance coefficient during six successive inspected cuts at $x = 125$ mm, data gathered using OMM.



(a) Mirror approach



(b) Variable cutting compliance coefficient approach

Figure 3-6 Compensation results for linear profile

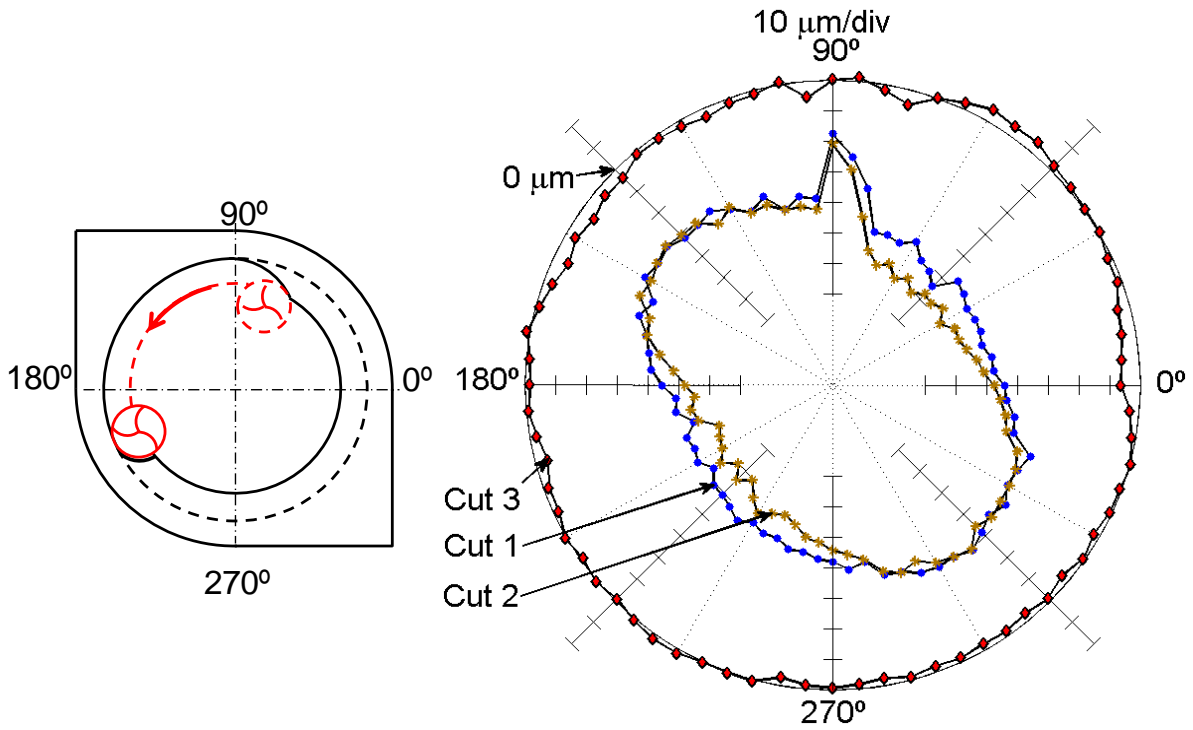


Figure 3-7 Left, Tool path and nominal depth. Right, form and size defect of the circular profile after two investigated cuts (Cut 1-2) and after the compensated cut (Cut 3).

CHAPITRE 4 CLOSED DOOR MACHINING-ERROR COMPENSATION OF COMPLEX SURFACES USING THE CUTTING COMPLIANCE COEFFICIENT AND ON-MACHINE MEASUREMENT FOR A MILLING PROCESS

Guiassa¹ R., J.R.R. Mayer¹, M. Balazinski¹, S. Engin², F-E. Delorme²

⁽¹⁾ Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, P.O. Box 6079, Station Downtown, H3C 3A7 Montréal (QC), Canada

⁽²⁾ Pratt and Whitney Canada Corp., Longueuil, QC, Canada

Article soumis à "International Journal of Computer Integrated Manufacturing" Novembre 2012

4.1 Abstract

Closed door machining is a strategy for producing a part within tolerance using on-machine measurement and automatic process adjustment as opposed to manual gauging interventions. The paper presents an integrated methodology for compensating errors detected using on-machine probing. In a multi-cut process, intermittent probing which is achieved through replacing the cutting tool with a touch probe, after each cut, can detect machining errors caused by deflection and the tool offset error. A cutting compliance coefficient model is used to estimate corrections to the tool path at the finishing cut based on a finite number of measured errors at discrete locations for previous cuts. The model also anticipates compliance changes and the effect of the compensated depth of cut. The complex surface to be machined is represented by a B-Spline model. The compensated tool path is obtained from B-Spline deformation techniques applied to the initial tool path according to the discrete corrections. Milling tests are carried out with and without compensation demonstrating a machining error reduction from +140 μm to $\pm 20 \mu\text{m}$.

4.2 Introduction

The conformity of a mechanical part to its drawing tolerance is an essential requirement for a manufacturing process. The machined part accuracy is affected by many error sources, some related to the machine-tool, others to the machining process. Machine-tool systematic errors affect the positioning accuracy of the tool with respect to the part. These are measured using a variety of instruments to detect the relative displacement error of the tool with respect to the part while the machine is unloaded. However, the systematic deviations related to the machining process, such as deflection under the cutting forces and tool wear [1, 2], cannot be investigated with this strategy. It is believed that such errors can be measured directly by on machine measurement (OMM). Using OMM, the machined part geometry can be measured immediately after a cut without removing the part from its machining setup. One of the principal advantages of OMM is the possible use of the measurement data to derive corrective actions in order to improve the machining process accuracy for the current part. As a result, a new task is added to the traditional mission of metrology so that it is not used only to get the final part dimension but also to produce timely information about the cutting process [3]. The process intermittent inspection (PII) [2] provides inspection data for the part between cuts so that machining errors detected at the semi-finishing cuts can be used to anticipate the errors at the finishing cut and conduct tool path correction [2]. The compensation model, developed in [4], estimate the correction magnitude of the cutting tool position for the finishing cut. At the semi-finishing cuts, the error and the cutting depth are measured. The intermittent measurement, in multi-cut mode, produces data able to estimate the trend of the cutting compliance coefficient which is used to predict the final cut deviation. This prediction takes into account the compensation and the material removal effects on the machining error magnitude.

For free form surfaces, the discrete compensation vectors, computed at a limited number of measured points locations according to the cutting compliance model, for a multi-cut process (MCP) [4], must be used to associate a deformation to the quasi-continuous free form tool path.

Free form deformation (FFD) [5] remains a complex task in engineering processes [6, 7]. In order to compensate the anticipated geometric manufacturing errors, the initial geometry is adjusted according to deformation vectors [7]. Such techniques are used, for example, to compensate the anticipated spring-back defect in sheet metal forming. The stamping tool geometry is modified so

that the deviation is compensated [6]. In machining, tool path modification was used to avoid machine configurations inducing numerical instability and uncontrollable positioning due to inverse kinematic singularity problems [8]. The common mathematical tools are the B-Spline and Bezier models for curves and surfaces. Both Bezier and B-Spline are derived from NURBS and are used for their good mathematical characteristics [9, 10]. Typically, the FFD process uses the geometry to be deformed and a set of deformation vectors to create the deformed shape. The B-spline volume deformation process is a popular tool to deform a given geometry according to deformation vectors [7]. In order to use this process, the initial geometry is represented by a tensor product combination of three B-Spline basis functions. For the B-Spline parameters (u, v, w) corresponds a point of Cartesian coordinates (x, y, z) in the volume. The B-Spline parameters of the deformation vector locations must be numerically computed for this model. The deformation process is based on a least-squares minimization problem which finds the control points adjustment. The objective is to reduce the deviation of the compensated position from the model. This process requires a large number of deformation vectors otherwise it can result in significant deviations [6] which could compromise the part accuracy. The proposed method does not require a minimum number of measured points to fit the compensated geometry.

This paper is dedicated to adapt in milling process and apply the B-Spline deformation techniques to compensate tool path, according to a restricted number of compensation vectors. The compensation vectors are computed, at the measured point locations, according to the cutting compliance model. Then, the data points used in the fitting process are the uncompensated data adjusted by the compensation vectors.

4.3 Modeling and compensation of error detected using on-machine measurement in a multi-cut process

4.3.1 Error model

The on-machine measured error is evaluated by comparing the actual surface measurement data with the desired surface derived from the original tool path commands. By using the machine tool as a measuring machine, thus substituting a touch probe for the cutting tool, the machine tool detects the combined error due to tool offset error (TOE) and machine-tool-part deflection [2]. In

a multi-cut process, as shown in Figure 4-1, the final desired shape is should be obtained after all cutting passes. The error model [4], for the j -th position of the i -th cut, can be written as:

$$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{ri,j} \quad (4.1)$$

where ε_{to} is the tool offset error and

$$\varepsilon_{ri,j} = \rho_{i,j} d_{i,j} \quad (4.2)$$

is the error due to the effective compliance of the system. It is the deflection at the position j under the cut i . The parameters $\rho_{i,j}$ and $d_{i,j}$ are the corresponding cutting compliance coefficient (C3) and the actual depth of cut respectively. Along the cutting profile, ε_r depends on the instantaneous local compliance of the system machine-tool-part in the direction normal to the surface.

In order to compensate the error at the finishing cut using eqs 1 and 2, the TOE and the actual C3 must be known at the finishing cut. In the two following sections, we discuss the techniques proposed to measure the TOE and to predict the C3 for the finishing cut.

4.3.2 On machine probe based technique for tool offset error estimation

Tool wear is one of the most important elements controlling the accuracy of the tool geometry which affects the accuracy of the part. The TOE depends on the tool wear evolution during the cutting process. Without compensation, the tool life, and so production costs, depends on the tool wear limits [11] required to produce the part within the given tolerance.

In this paper, a single value of TOE producing a constant offset, for the complete machined profile, is considered. According to eqs.1 and 2, the cutting depth error due to compliance is null when the actual depth of cut is zero and at this point, in theory, the total error is equal to TOE. This is used to estimate TOE. Figure 4-3 illustrates the cutting path used to implement the TOE estimation procedure. By programming a change in the depth of cut, the corresponding measured error is used to formulate the linear approximation of ε_{to} . In order to respect the chip formation concept and the necessary minimum chip thickness [12], the estimation of TOE can be performed using the approximation illustrated in Figure 4-3 such that the minimum depth of cut is viable.

4.3.3 Cutting compliance coefficient

The cutting compliance affects the accuracy generally by leaving extra material on the part and depends on the machine, the tool, the part and the process. Theoretical prediction of the system deflection is complicated because it is affected by the cutting force, vibrations, the part/tool material and geometry. The proposed approach relies solely on machine measurement through probing. The relation between the deflection and the actual depth of cut, eq. 2, is used to predict the C3 directly from previous measured errors and cutting depths.

In a multi-cut process, the deflection may increase from one cut to the next, even for equal depths of cut, because the part loses stiffness after material removal. Therefore, the C3 is affected by the material removal and increases as illustrated in Figure 4-4-a. The parameters of $\rho_{i,j}$, $d_{i,j}$ and TOE are measured through the intermittent inspection process.

In order to compensate the system deflection at the finishing cut using the C3 method, the expected cutting compliance coefficient $\rho_{f,j}$ is predicted before the final cut and then is used to estimate the corresponding deflection. The Lagrange extrapolation, illustrated in Figure 4-4-a, is adopted and is written as:

$$\rho_{f,j} = \sum_{i=1}^{f-1} \rho_{i,j} L_{i,j} \quad (4.3)$$

where $L_{i,j}$ are the Lagrange basis polynomials associated with the cumulated depths, after each cut [4] in the MCP, as:

$$L_{i,j} = \prod_{k=1, k \neq i}^{f-1} \frac{\sum_{s=1}^f d_{s,j} - \sum_{s=1}^k d_{s,j}}{\sum_{s=1}^f d_{s,j} - \sum_{s=1}^k d_{s,j}} \quad (4.4)$$

Eqs. 1 and 2, at the finishing cut, can be written as:

$$\varepsilon_{f,j} = \varepsilon_{to} + \rho_{f,j} d_{f,j} \quad (4.5)$$

where $d_{f,j}$ is the desired final cutting depth which includes the nominal (initial) depth $d_{nf,j}$ and the previous machining error $\varepsilon_{f-1,j}$:

$$d_{f,j} = d_{nf,j} + \varepsilon_{f-1,j} \quad (4.6)$$

In order to anticipate and eliminate the expected error, $\varepsilon_{f,j}$, this error is added to the tool path in the opposite direction so that the compensation magnitude c_j is:

$$c_j = \varepsilon_{f,j}. \quad (4.7)$$

Note that, the coupled effect of compensation and deflection is taken into account in the prediction of $\varepsilon_{f,j}$ through the predicted C3 and the desired depth of cut from eq. 4.6.

As indicated previously, the radial compensation estimation is based on the C3 estimation for the final cut f . To reduce the number of inspected semi-finishing cut and so doing increase productivity, the C3 estimation is linearized around the last semi-finishing cut ($f-1$), as illustrated in Figure 4-4-b, resulting in the simplified relation:

$$\rho_{f,j} = \rho_{f-1,j} + \frac{\rho_{f-1,j} - \rho_{f-2,j}}{d_{f-1,j}} d_{f,j} \quad (4.8)$$

The compensation magnitude, for the measured position j , can be approximated for a three cut process (3CP) with two inspected cut as [4]:

$$c = \varepsilon_{to} + \frac{d_3}{d_2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_{to}) + \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (4.9)$$

where $d_3 = d_{n3} + \varepsilon_2$ is the desired cutting depth (eq. 4.6), d_2 is the actual cutting depth for the second cut and ε_2 and ε_1 are the measured errors after the second and the first cut respectively.

4.4 Continuous tool path compensation from a set of discrete compensation vectors

The goal of the continuous tool path compensation procedure is to generate the compensated tool path from one initially programmed and a set of discrete compensation vectors. Using the B-Spline deformation method [7], the compensated tool path is generated through a least-squares optimization problem to create a B-Spline geometry close to the adjusted data points. In order to generate a given B-Spline from data points, the number of fitted points is selected according to the required fit quality [9]. Using OMM, the discrete compensation vectors, needed to generate the adjusted data points, are calculated only where probing data was gathered. These are kept to a minimum in order to reduce the loss of production time due to the lengthy discrete probing process unless a faster scanning process can be used.

The tool path compensation through the B-Spline deformation is performed according to the following steps:

- a) the tool path is converted to a set of successive points and fitted to create a B-Spline. The initial geometry must be retraced within the required tolerance;
- b) the set of points in a) are adjusted according to the compensation vectors computed at the measured points locations by eq.4.9;
- c) a new set of points is fitted to create the deformed B-Spline.

4.4.1 The tool path as a B-Spline

According to [9], the B-Spline curve, $\mathbf{F}(u)$, of degree n , is a piecewise polynomial curve created such that:

$$\mathbf{F}(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \mathbf{P}_i \quad u \in [0, 1] \quad (4.10)$$

where $N_{i,p}$ is the basis functions of degree p defined over a knot sequence $T = (t_0, t_1, \dots, t_{n+p+1})$.

\mathbf{P}_i are the $(n+1)$ control points. To approximate the data points \mathbf{Q}_s (tool path data points) by the B-Spline $\mathbf{F}(u)$, the positions of the control points are computed through the resolution of the minimization problem in the least-squares sense, i.e.:

$$\min_P J(\mathbf{P}) = \sum_{s=1}^m |\mathbf{Q}_s - \mathbf{F}(u_s)|^2 \quad (4.11)$$

where $\mathbf{Q}_s = [x_s \ y_s \ z_s]$, $s = 1, \dots, m$, are the ordered data points coordinates to be fitted (tool path data points). u_s is the pre-computed B-Spline parameter values corresponding to the data points. The chord length parameterization is used [9] to assign a value u_s to each data points. Note that the initial G-code containing compact machining cycles such as linear and circular interpolations must be rewritten to generate only small linear interpolations so that the adjustment of the extracted points is possible [4].

4.4.2 Tool path adjustment strategy for B-Spline deformation

The initial data points are adjusted by adding small compensations \mathbf{c}_s , illustrated in Figure 4-5.

For the point of B-Spline parameter value u_s , the adjusted point \mathbf{Q}'_s is computed as:

$$\mathbf{Q}'_s = \mathbf{F}(u_s) + \mathbf{c}_s \quad (4.12)$$

where $\mathbf{F}(u_s)$ is the initial vector position given by the initial B-Spline function and $\mathbf{c}_s = c_s \mathbf{n}_s$ is the adjustment vector with a magnitude of c_s in the direction of the B-Spline normal vector \mathbf{n}_s .

c_s is estimated as a linear combination of the two compensations c_k and c_{k+1} as:

$$c_s = c_k + (c_{k+1} - c_k) \frac{u_s - u_k}{u_{k+1} - u_k} \quad (4.13)$$

where c_k and c_{k+1} are the compensations computed at the two successive measured points of parameter values u_k and u_{k+1} such as $u_k < u_s < u_{k+1}$.

Note that the parameter value u_j , for the measured point \mathbf{M}_j , is computed such as:

$u_j = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{M}_j)$, i.e. by projecting the measured points into the B-Spline [9].

The new set of points (\mathbf{Q}'_s) remain close to the initial tool path ($\mathbf{F}(u_s)$). They are fitted to create the deformed B-Spline, $\mathbf{F}'(u)$ as:

$$\mathbf{F}'(u_j) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_j) \mathbf{P}'_i \quad (4.14)$$

$\mathbf{F}'(u)$ has the same number of control points as $\mathbf{F}(u)$ and the same sequence of knot vector. Therefore, only the positions of the control points are adjusted.

The control points adjustment $\Delta \mathbf{P}_i$, such as $\mathbf{P}'_i = \mathbf{P}_i + \Delta \mathbf{P}_i$, are computed by resolving a minimization problem similar to eq.4.11:

$$\min_{\Delta \mathbf{P}} J(\Delta \mathbf{P}) = \sum_{s=1}^m \left| \mathbf{Q}'_s - \mathbf{F}'(u_s) \right|^2 = \sum_{s=1}^m \left| \mathbf{Q}'_s - \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_s) \cdot (\mathbf{P}_i + \Delta \mathbf{P}_i) \right|^2 \quad (4.15)$$

The modified B-Spline, $\mathbf{F}'(u)$, is the compensated tool path. The successive compensated tool positions $\mathbf{F}'(u_s) = [x'(u_s) \quad y'(u_s) \quad z'(u_s)]$, $s = 1, \dots, m$ can be generated by subdividing the compensated B-Spline into a set of linear segments with respect to the chordal error tolerance to create the G-code with basic commands (G01).

The flowchart of the NC program compensation procedure is shown in Figure 4-6. The tool path (successive tool positions) is extracted from the NC program as a sequence of m ordered data points. The created B-Spline is close to the data points within the given tolerance. The discrete compensations vectors c_j^* are computed according to the cutting compliance model for a multi-cut process and added to the tool path at the positions of the B-Spline parameters u_j^* . The compensated tool path is generated by fitting the adjusted tool positions \mathbf{Q}'_s .

4.5 Experimental validation

A machine-tool made by Huron, model KX8-Five fitted with a machine probe model MP700 made by Renishaw is used to perform the milling and probing for the tests. After roughing, the three-cut process and compensation procedure is conducted on the part shown in Figure 4-7. Two identical parts are designed with a B-Spline curve and machined, one without compensation and the other with compensation. All cutting parameters such as cutting speed and feed rates are kept constant for both machining operations. The cutting tool is from HANITA model FZ 4AN3 19007. Furthermore, in order to ensure good machine tool repeatability, both test pieces are machined at the same machine tool workspace location.

After each cut, the probe replaces the cutting tool to perform the intermittent measurement. The location of the probed points and the corresponding B-Spline normalized parameters are shown in

Figure 4-8. The parameter values are used to program the probing operations.

The on-machine measured error for the first feature is shown in Figure 4-9. The error is an undercut material for all the profile and the magnitude is minimal at points number 8 and 9. At these points, according to the error model eqs.1-2, the programmed depth is reduced to minimize the compliance effect. This is used to estimate the TOE at the zero programmed depth of cut. For this test parts, a fast and practical tool path planning for TOE estimation is shown in Figure 4-10. The goal is to create a cutting zone with a minimum cutting depth. The TOE is supposed equal to the measured error for this zone. Following the tool path illustrated in Figure 4-10, a zero programmed depth zone is created. The TOE is approximated by the errors measured in this zone.

The tool offset measurement procedure is applied to each cut. The results show, for this case study, that no significant change in the TOE occurs between cuts. This justifies the use of a single value of TOE in the compensation formulation (eq. 10). As can be seen in Figure 4-9, the evolution of the error in MCP is in agreement with the thickness of the feature and the error increases significantly when the compliance increases due to low thickness.

For the second test piece, the results are shown in Figure 4-12. The OMM errors for the first and the second cuts (uncompensated cuts) are similar to those obtained for the first feature. The errors are reproduced within $\pm 6 \mu\text{m}$ (95 %). For the finishing cut (compensated cut), the tool path is corrected with the continuous compensation computed through eq. 4.14 and shown in Figure 4-11. As shown in in Figure 4-12, the OMM error is reduced from the maximum expected value of $140 \mu\text{m}$ (first featured) to less than $\pm 20 \mu\text{m}$.

4.6 Conclusion

A model and its implementation strategy are proposed to compensate the machining errors detected using an on-machine measurement procedure. In a multi-cut milling process, the intermittent measurement data acquired at the semi-finishing cuts is used to estimate the expected error at the finishing cut for the current part. This error is attributed to the compliance effect and the tool offset error. The cutting compliance model takes into account the previous measured

error and anticipates the material removal effect on the compliance. The tool path of the uncompensated finishing cut is converted to a B-Spline function. The corresponding full compensated tool path is a free form trajectory which is the uncompensated B-Spline deformed according to the discrete compensations at a given set of measured points. The experiments show an improvement of the machining accuracy. The error, as measured by the touch probe fitted machine, is reduced, for the case study, from 140 μm in the uncompensated case to $\pm 20 \mu\text{m}$ after compensation.

4.7 References

- [1] P. M. Ferreira and C. R. Liu, "A Method for Estimating and Compensating Quasistatic Errors of Machine Tools," *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 115, pp. 149-159, february 1993.
- [2] H. T. Bandy, Donmez M.A., Gilsinn D.E., Kennedy M., Yee, K. W., Ling A. V., Wilkin N. D., "A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection," *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 6811*, pp. 1-77, 2001.
- [3] H. Kunzmann, T. Pfeifer, R. Schmitt, H. Schwenke, and A. Weckenmann, "Productive metrology-adding value to manufacture," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, pp. 691-704, 2005.
- [4] R. Guiassa and J. R. R. Mayer, "Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 391-394, 2011.
- [5] T. W. Sederberg and S. R. Parry, "Free-form deformation of solid geometric models," *SIGGRAPH Comput Graph*, vol. 20 (4), pp. 151–160, 1986.
- [6] R. F. Sarraga, "Modifying CAD/CAM surfaces according to displacements prescribed at a finite set of points," *Computer-Aided Design*, vol. 36, pp. 343-349, 2004.
- [7] D. Biermann, A. Sacharow, T. Surmann, and T. Wagner, "Direct free-form deformation of NC programs for surface reconstruction and form-error compensation," *Production Engineering*, vol. 4, pp. 501-507, 2010.

- [8] A. Affouard, E. Duc, C. Lartigue, J. M. Langeron, and P. Bourdet, "Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 415-425, 2004.
- [9] L. Piegl and W. Tiller, "The NURBS Books (2nd ed.)," Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [10] A. Barari, H. A. ElMaraghy, and P. Orban, "NURBS representation of estimated surfaces resulting from machining errors," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 22, pp. 395-410, 2009/05/01 2009.
- [11] V. P. Astakhov, "The assessment of cutting tool wear," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 637-647, 2004.
- [12] J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 313-332, 2006.

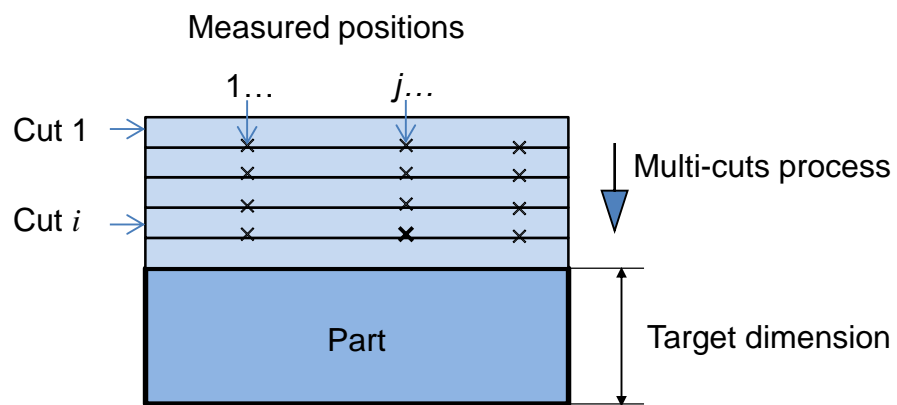


Figure 4-1. Multi-cut process

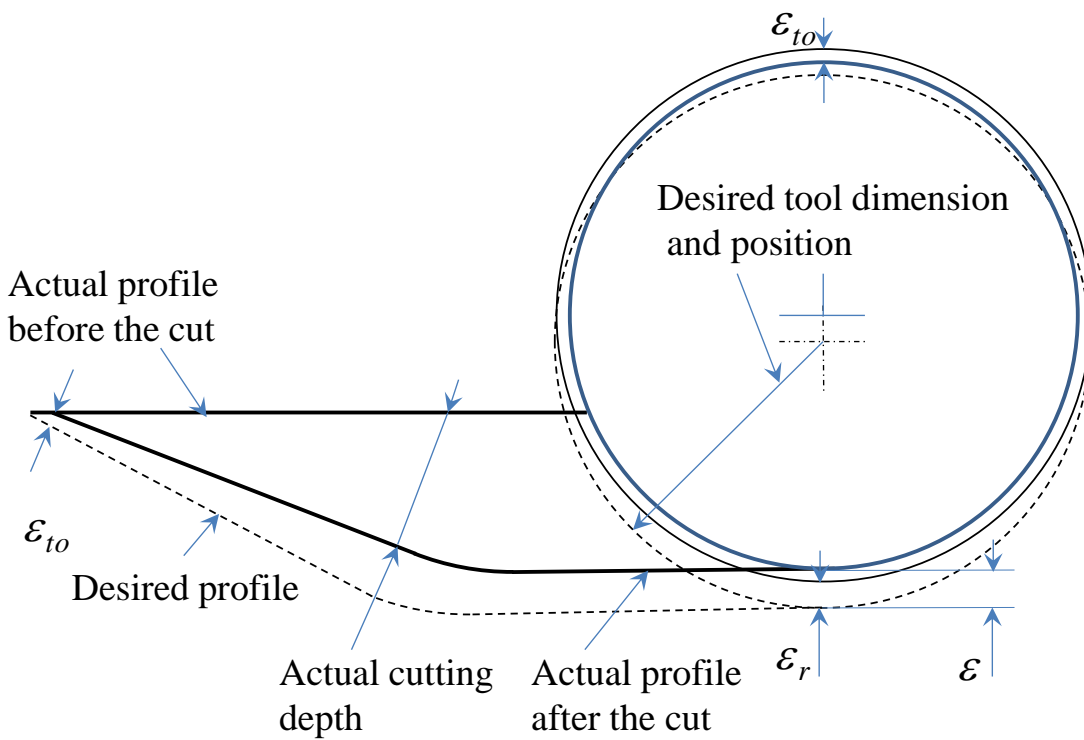


Figure 4-2 Tool offset error estimation. According to the error model, it is the deviation of the actual profile after the cut from the corresponding desired profile when the actual depth of cut tends toward zero.

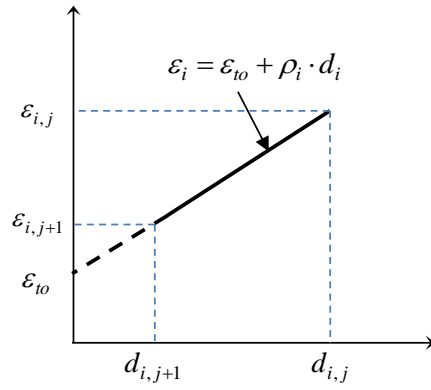


Figure 4-3 Linear estimation of TOE

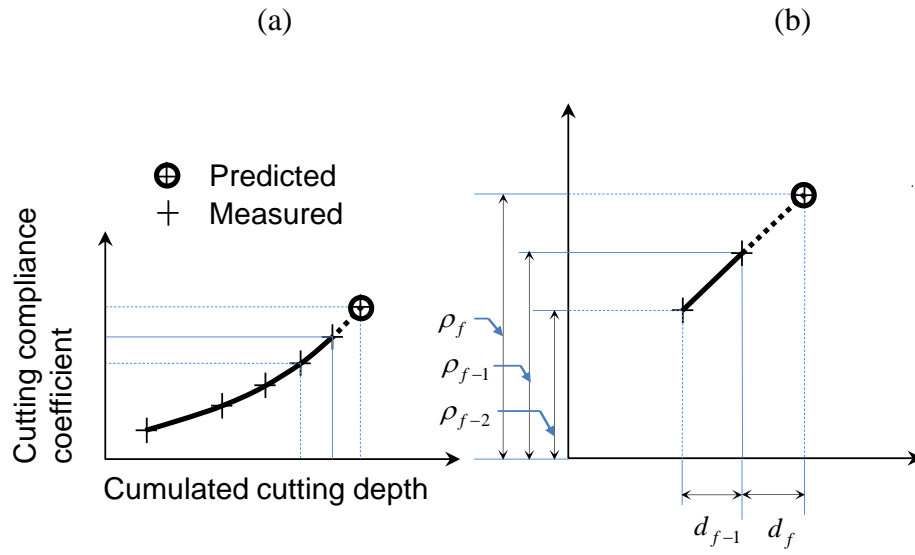


Figure 4-4. Illustration of the C3 evolution, (a) general model, (b) linearized model.

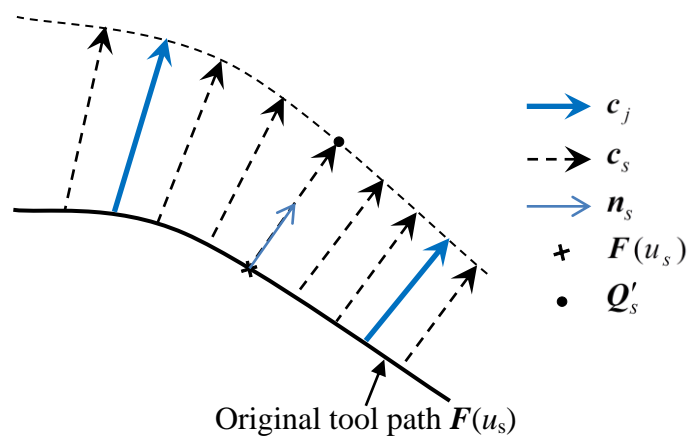


Figure 4-5. Data points adjustment

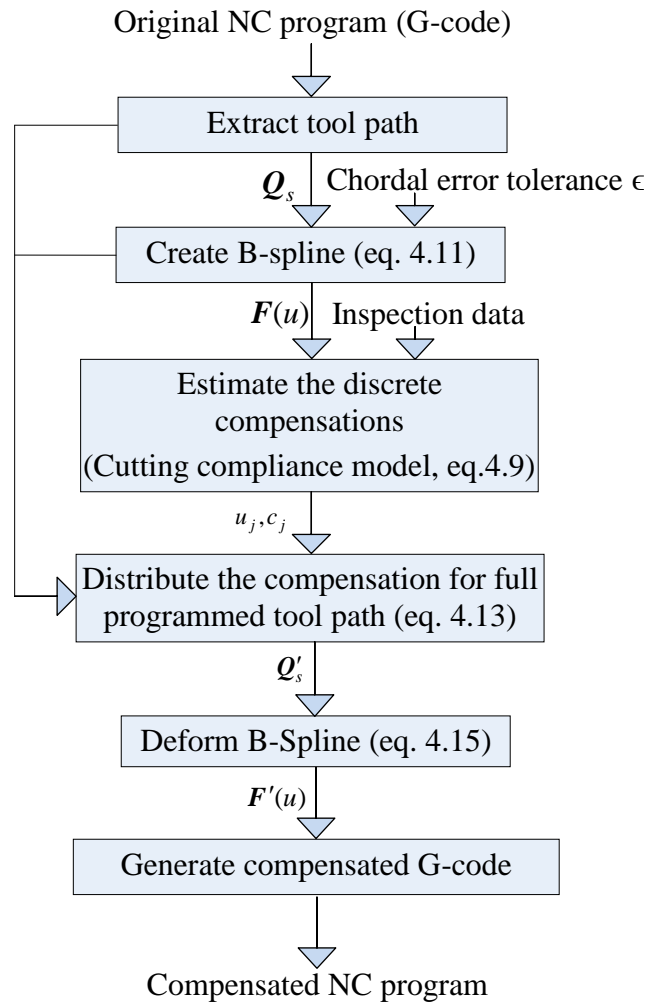


Figure 4-6 Flowchart of the NC program compensation

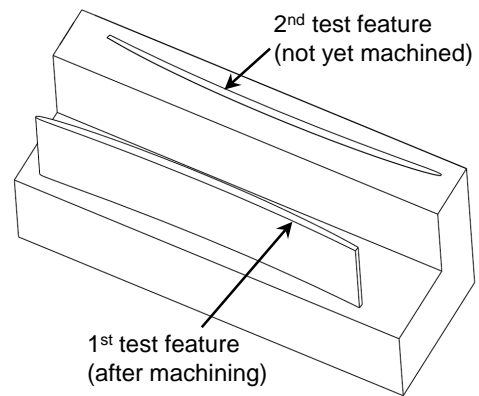
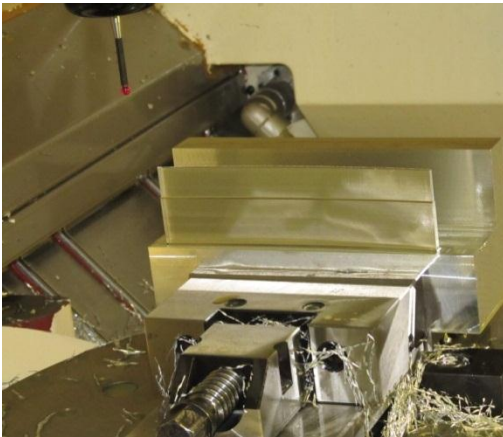
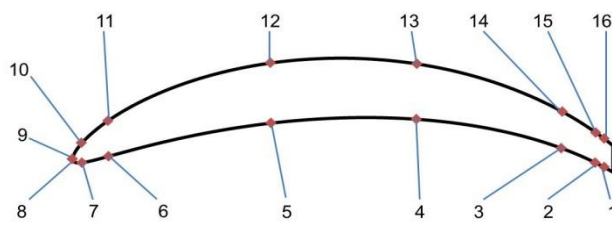


Figure 4-7. Test part



u			
Point Value		Point Value	
1	0.7	9	49.7
2	1.4	10	53.8
3	4.3	11	56.3
4	16.5	12	70.4
5	28.9	13	83.0
6	42.6	14	95.6
7	45.0	15	98.5
8	49.7	16	99.3

Figure 4-8. Left, measured points locations along the 2D profile. Right, B-Spline parameter values of the corresponding measured points.

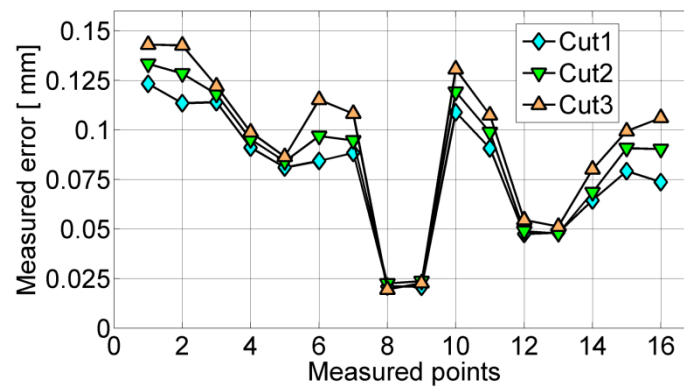


Figure 4-9. On machine measured error for three cut performed without compensation for the test part.

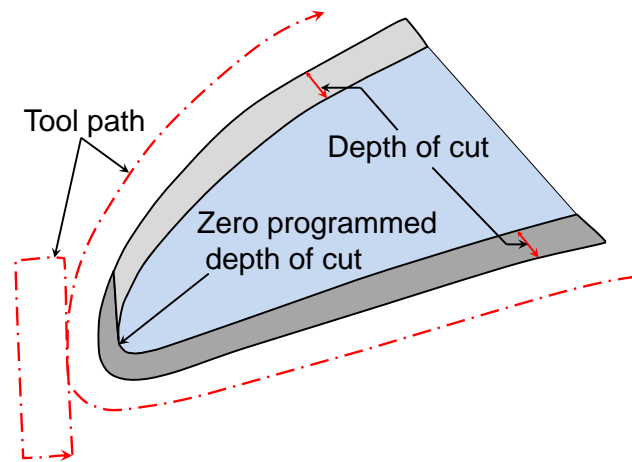


Figure 4-10. Tool path planning for depth of cut reduction. At the zero programmed depth, the measured error is assumed equal to the TOE.

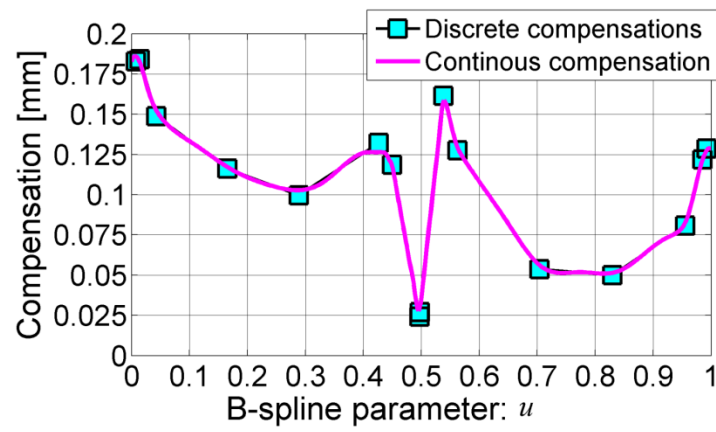


Figure 4-11. The discrete and the continuous (B-Spline deformation) compensation of the tool path for the finishing cut of the 3CP performed for the second feature of the part from Figure 4-7.

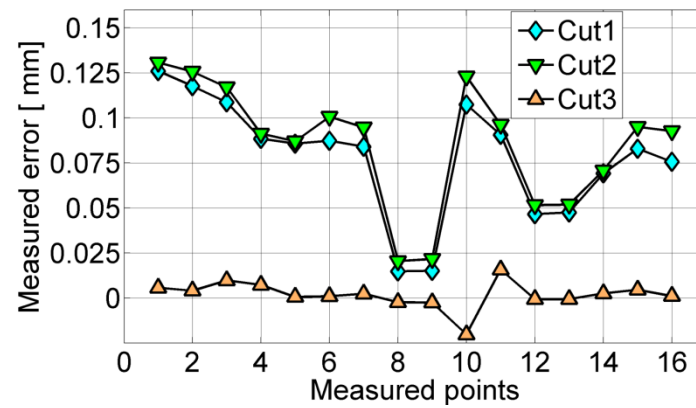


Figure 4-12. On machine measured error for the 3CP with compensation for the finishing cut performed for the second feature of the part shown in Figure 4-7.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GENERALE

Cette thèse traite de l'exploitation de la fonction de mesure sur machine-outils (MMO) par palpage pour améliorer la précision de l'usinage en apportant des ajustements au processus de fabrication. Ces ajustements sont basés sur les résultats d'inspection de la pièce tout au long de sa fabrication. Traditionnellement, la vérification par inspection de la conformité de la pièce est une opération en aval suivant le processus de fabrication. Donc, son rôle est pénalisant pour la production. Il ne peut être qu'informatif et n'apporte pas d'amélioration pour la pièce inspectée. La MMO intéresse les chercheurs et les industriels pas seulement parce qu'elle s'effectue sous le même montage de la pièce et en utilisant une seule machine pour l'usinage et pour l'inspection mais aussi parce qu'elle peut donner de l'information sur la précision de la pièce au moment opportun. Des actions peuvent être prises pour changer la tendance indésirable de la précision avant de finir la pièce. Dans ce cas, le rôle de la MMO est productif. En plus de sa tâche traditionnelle, l'inspection sur machine-outils produit des indications sur le processus de fabrication. Il en résulte que le taux de conformité peut augmenter en implémentant des stratégies de correction basées sur la MMO.

Les procédures existantes de compensations utilisant la MMO traitent, en général, l'erreur comme répétable pour simplifier la formulation de la correction. En gardant les paramètres de coupe inchangés, l'erreur est supposée reproductible avec la même amplitude. Donc une correction inversant l'erreur mesurée en semi-finition peut anticiper l'erreur en finition pour un procédé d'usinage stable sans broutage. L'erreur mesurée sur machine-outils est souvent dominée par la déflexion du système machine-outil-pièce et l'imprécision des dimensions de l'outil de coupe. Comme la force de coupe est à l'origine de la déflexion et que la variation de la profondeur de coupe provoque une variation de la force de coupe, la déflexion est sensible à la variation de la profondeur de coupe. En apportant une correction à la trajectoire de l'outil de coupe, la profondeur de coupe peut subir une variation conduisant à une variation de la déflexion. À ce moment, l'hypothèse de la répétabilité de l'erreur est affectée parce que l'amplitude de la profondeur de coupe qui est à l'origine de la déflexion n'est pas assurée constante.

Généralement, la trajectoire de l'outil de coupe est une succession de formes géométriques connues comme le segment de droite et l'arc de cercle. Elle peut contenir aussi des courbes

gauches. La compensation de la trajectoire fait perdre le type de la forme géométrique initiale et prends une forme gauche qui est le profil nominal plus une compensation. Les travaux de recherche précédant cette thèse proposent une variété de procédés pour produire la trajectoire compensée. Certains gardent le type de la forme initiale mais change d'orientation et/ou de position tout en gardant le profil initial comme un corps rigide. D'autres créent la forme compensée comme une courbe Spline passant par les points compensés. Convertir toutes les formes constituant la trajectoire en une succession de segments de droite et puis, compenser chaque position est une autre alternative.

L'erreur mesurée sur machine-outils après usinage est modélisée comme la somme de deux composantes. Une composante constante liée à l'outil de coupe et une autre liée à la compliance du système machine-pièce-outil et qui dépend de la profondeur de coupe. La première composante est considérée constante et donc elle est compensée en finition par la même amplitude. Pour modéliser la deuxième composante, le coefficient de la compliance de coupe est défini comme étant le rapport entre déflexion et profondeur de coupe. Ce coefficient varie le long de la trajectoire en accord avec la géométrie de la pièce et varie, pour une même position en mode multi-passe, en accord avec la profondeur de coupe et la dégradation de la rigidité à cause de l'enlèvement de la matière. Avant compensation, ce rapport est mesuré indirectement. L'estimation de ce rapport par extrapolation pour la passe de finition permet d'estimer la déflexion attendue permet donc de compenser cette déflexion.

La génération de la trajectoire compensée par quelques vecteurs calculés à des points spécifiques est effectuée en déformant une B-Spline. La qualité d'approximation par une courbe des points compensés peut être affectée par le nombre limité des points mesurés. Une répartition de la compensation est effectuée pour atteindre le nombre minimal requis.

Les résultats montrent qu'il est possible d'anticiper l'erreur, ayant une tendance selon ce modèle, par modification de la trajectoire en finition. Le modèle développé estime mieux que la simple compensation dite de *miroir* qui inverse l'erreur sans chercher sa source. Dans le cas du défaut de forme d'une plaque mince, l'erreur est réduite de 78 μm à $\pm 3 \mu\text{m}$.

Pour effectuer la compensation, la stratégie de séparation des composantes d'erreur est incluse dans le processus de fabrication/inspection. Par simple réduction de la profondeur de coupe, il est possible d'évaluer une approximation de l'erreur d'offset de l'outil. En effectuant la

compensation pour un profil circulaire, l'erreur de l'offset d'outil est estimée à 20 μm . Cette erreur est soustraite de l'erreur totale pour isoler l'erreur causée par la déflexion. Le résultat montre clairement la tendance de l'erreur qui dépend de la profondeur de coupe et de la compliance. L'augmentation de la compliance à cause de l'enlèvement de la matière est mesurée grâce l'inspection intermittente en mode multi-passe.

En production, il est intéressant de minimiser le temps d'inspection tout en gardant un contrôle actif de la précision. Le test effectué sur deux éléments identiques sur la même pièce est conçu pour vérifier la possibilité d'omission de l'inspection dans le cas de la production en série. La répétabilité pour ce test est comprise dans la fourchette de $\pm 3 \mu\text{m}$ pour une erreur allant jusqu'à 130 μm .

Les résultats montrent que l'erreur mesurée sur machine-outils dépend de la profondeur de coupe. L'augmentation de la profondeur de coupe provoque une augmentation de l'erreur. Ce qui appuie l'hypothèse de son importance.

L'article 1 répond à la première question de recherche. L'amplitude de la compensation est estimée par l'extrapolation du coefficient de la compliance de la coupe du système. Les résultats surtout, pour le profil circulaire, montrent l'agrément de l'erreur ainsi que son évolution en mode multi- passe avec le modèle de l'erreur. Le modèle de compensation a permis de réduire l'erreur à un niveau de précision acceptable. La réponse à la deuxième question se trouve dans le deuxième article. La trajectoire a été compensée par déformation de B-Spline et les résultats de compensation sur la pièce démontrent l'efficacité de son arrimage avec la méthode d'extrapolation du coefficient de compliance.

CHAPITRE 6 CONTRIBUTION

Cette thèse a présenté une stratégie intégrée de compensation des erreurs d'usinage mesurées par palpement sur machine-outils. Une modélisation de l'erreur selon sa source et une compensation selon sa tendance. Le modèle proposé calcule une compensation en utilisant seulement les données de métrologie embarquée qui peuvent indiquer le défaut de fabrication tant le coefficient de la compliance de coupe que l'usure de l'outil de coupe.

Je récapitule la contribution de cette thèse par les points suivants:

- Un modèle original pour l'erreur d'usinage mesurée, immédiatement après la coupe, par palpement sur machine-outils;
- Un modèle original de la compensation de l'erreur mesurée sur machine-outils en mode passe-multiple;
- Un coefficient de la compliance de coupe qui sert à estimer l'erreur attendue en finition. Il est obtenu seulement à partir des mesures sur machine-outils;
- Une méthode de déformation de NURBS suivant un nombre limité de vecteurs de déformation et son application dans la génération de la trajectoire compensée;
- Une méthode originale d'estimation de défaut de biais de l'outil de coupe basée sur la mesure, par palpement sur machine-outil, des surfaces usinées.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette thèse a présenté une méthodologie intégrée pour la modélisation et la compensation des erreurs de surface usinée mesurées par palpé sur machines-outils. Le modèle de l'erreur est développé en mode de fraisage et est basé sur le coefficient de la compliance de la coupe qui est variable et dépend de plusieurs paramètres comme la pièce, l'outil, les conditions et le mode de la coupe. Le processus intermittent d'inspection est suivi pour mesurer la pièce en semi-finitions. En finition, le coefficient est prédit par extrapolation afin d'en déduire le fléchissement attendu. La compensation est une correction égale à la déflexion attendue plus le défaut d'outil de coupe. La modélisation tient en considération l'effet combiné compensation/déflexion dans l'estimation de la compensation et tient aussi en compte l'effet de l'enlèvement de la matière sur la compliance de la pièce. Les compensations sont discrètes et calculées là où les mesures sont prises. Pour générer une compensation continue, la trajectoire de l'outil est convertie en B-Spline. Par la suite, une technique de déformation est adoptée pour calculer la nouvelle trajectoire à partir de la trajectoire non-compensée et un ensemble de compensations discrètes calculées à des points spécifiques le long du profil usiné.

Les résultats sont significatifs validant les modèles de l'erreur et de la compensation. Pour les conditions expérimentales étudiées, les erreurs ont été réduites de 45 μm à 3 μm pour une paroi linéaire. Pour une paroi circulaire de compliance variable, l'erreur est réduite, en fraisage orbitale, de 78 μm à $\pm 6 \mu\text{m}$. Pour une trajectoire modélisée par B-Spline semblable à une section de profil aérodynamique, la stratégie de compensation de la trajectoire ainsi que la stratégie de la déformation de B-Spline ont été vérifiées et la réduction de l'erreur est de 140 μm à $\pm 20 \mu\text{m}$.

Travaux Futurs

Comme le modèle de compensation concerne l'erreur mesurée sur machine-outils, on peut suggérer des travaux futurs pour la suite de ce travail comme suit:

- Enrichir le modèle en incluant les erreurs géométriques de la machine-outils elle-même;
- Étudier l'usure de l'outil de coupe dans le cas de l'usure rapide par usinage de matériau dur et intégrer le modèle de l'usure dans le modèle de compensation enrichi;

- Étudier l'impact du choix de localisation des points de mesure sur l'efficacité de la compensation;
- Étudier l'optimisation du temps de mesure et l'impact de la vitesse de mesure.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools -- a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1235-1256, 2000.
- [2] X.-J. Wan, C.-H. Xiong, C. Zhao, and X.-F. Wang, "A unified framework of error evaluation and adjustment in machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, pp. 1198-1210, 2008.
- [3] ISO, "Test Code for Machine Tools. Part 1. Geometric Accuracy of Machines Operating Under No-Load or Finishing Conditions," *ISO Geneva*, vol. 230-1, 1996.
- [4] T. O. Ekinici and J. R. R. Mayer, "Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1997-2004, 2007.
- [5] S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, and T. Matsushita, "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools," *Precision Engineering*, vol. 34, pp. 387-398, 2010.
- [6] P. Majda, "Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on joint kinematic error in machine tools," *Precision Engineering*, vol. 36, pp. 369-378, 2012.
- [7] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review. Part II: Thermal errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1257-1284, 2000.
- [8] M. H. Attia and L. Kops, "Computer simulation of nonlinear thermoelastic behavior of a joint in machine tool structure and its effect on thermal deformation," *Journal of engineering for industry*, vol. 101, pp. 355-361, 1979.
- [9] J. Zhu, J. Ni, and A. J. Shih, "Robust machine tool thermal error modeling through thermal mode concept," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 130, pp. 0610061-0610069, 2008.

- [10] X. B. Chen, A. Geddam, and Z. U. Yuan, "Accuracy Improvement of Three-Axis CNC Machining Centers by Quasi-Static Error Compensation," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 16, pp. 323-336, 1997.
- [11] Y. Altintas and E. Budak, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, pp. 357-362, 1995.
- [12] S. Smith, "Using stability lobe diagrams," *University of North Carolina at Charlotte*, 2009.
- [13] H. Paris, G. Peigne, and R. Mayer, "Surface shape prediction in high speed milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, pp. 1567-1576, Dec 2004.
- [14] J. W. Sutherland and R. E. DeVor, "Improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems," *Journal of engineering for industry*, vol. 108, pp. 269-279, 1986.
- [15] V. S. Rao and P. V. M. Rao, "Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 2036-2043, 2006.
- [16] Z. Yazar, K.-F. Koch, T. Merrick, and T. Altan, "Feed rate optimization based on cutting force calculations in 3-axis milling of dies and molds with sculptured surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 34, pp. 365-377, 1994.
- [17] Y. Altintas, "Direct adaptive control of end milling process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 34, pp. 461-472, 1994.
- [18] Kline W. A., R. E. Devor, and I. A. Shareef, "Prediction of surface accuracy in end milling," *J ENG IND TRANS ASME*, vol. V 104, pp. 272-278, 1982.
- [19] A. Tang, Z. Liu, and H. Ma, "Modeling and simulation of big deformations of thin walled plate in end milling process," Jinan, China, 2007, pp. 2384-2388.
- [20] S. Ratchev, S. Liu, and A. A. Becker, "Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162-163, pp. 673-681, 2005.

- [21] S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, and A. A. Becker, "A flexible force model for end milling of low-rigidity parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153-154, pp. 134-138, 2004.
- [22] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1235-1256, 2000.
- [23] N. L. de Lacalle and A. L. Mentxaka, *Machine Tools for High Performance Machining*: Springer, 2008.
- [24] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, "Geometric error measurement and compensation of machines--An update," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 660-675, 2008.
- [25] G. Cui, Y. Lu, J. Li, D. Gao, and Y. Yao, "Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12, 2012.
- [26] S. Sartori and G. X. Zhang, "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, pp. 599-609, 1995.
- [27] M.-W. Cho, T.-I. Seo, and H.-D. Kwon, "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, pp. 88-99, 2003.
- [28] L. Kops, M. Gould, and M. Mizrach, "A search for equilibrium between workpiece deflection and depth of cut: Key to predictive compensation for deflection in turning," *ASME-PED*, vol. 68, pp. 819-825, 1994.
- [29] C.-C. Lo and C.-Y. Hsiao, "Method of tool path compensation for repeated machining process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 205-213, 1998.
- [30] J. Mou and C. Richard Liu, "A method for enhancing the accuracy of CNC machine tools for on-machine inspection," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 11, pp. 229-237, 1992.

- [31] H. T. Bandy, Donmez M.A., Gilsinn D.E., Kennedy M., Yee, K. W., Ling A. V., Wilkin N. D., "A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection," *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 6811*, pp. 1-77, 2001.
- [32] J. P. Choi, B. K. Min, and S. J. Lee, "Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155-156, pp. 2056-2064, 2004.
- [33] A. Chen, "Integrated inspection for precision part production," Ph.D., Georgia Institute of Technology, United States - Georgia, 2006.
- [34] T. Pfeifer, "Process-Intermittent Workpiece Measurement on NC (CNC) Machine Tools," *Technology of Machine Tools*, vol. 5, pp. 9-15, 1980.
- [35] Z. Q. Liu and P. K. Venuvinod, "Towards autonomous compilation of turning force databases: Utilization of on-machine measurement of machined parts," *Machining Science and Technology*, vol. 5, pp. 171-193, 2001.
- [36] Z. Q. Liu and P. K. Venuvinod, "Error compensation in CNC turning solely from dimensional measurements of previously machined parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 48, pp. 429-432, 1999.
- [37] S.-H. Suh, E.-S. Lee, and J.-W. Sohn, "Enhancement of geometric accuracy via an intermediate geometrical feedback scheme," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 18, pp. 12-21, 1999.
- [38] D. E. Gilsinn, H. T. Bandy, and A. V. Ling, "A spline algorithm for modeling cutting errors on turning centers," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13, pp. 391-401, 2002.
- [39] X. Qian, W. Ye, and X. Chen, "On-machine measurement for touch-trigger probes and its error compensation," *Key Engineering Materials*, vol. 375-376, pp. 558-563, 2008.
- [40] Y. H. Chen and C. Y. Liu, "Robust segmentation of CMM data based on NURBS," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, pp. 530-534, 1997.

- [41] H. A. ElMaraghy, A. Barari, and G. K. Knopf, "Integrated Inspection and Machining for Maximum Conformance to Design Tolerances," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 411-416, 2004.
- [42] W. T. Lei and M. P. Sung, "NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, pp. 307-319, 2008.
- [43] L. Piegl and W. Tiller, "The NURBS Books (2nd ed.) " *Springer, Berlin, Heidelberg* 1997.
- [44] H. Shen, J. Fu, Y. He, and X. Yao, "On-line Asynchronous Compensation Methods for static/quasi-static error implemented on CNC machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 60, pp. 14-26, 2012.
- [45] R. Guiassa and J. R. R. Mayer, "Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 391-394, 2011.

ANNEXE A Amélioration de la précision d'usinage par l'inspection sur machine-outil et l'ajustement de la trajectoire de coupe

R. Guiassa¹ et J.R.R. Mayer¹

¹ Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, P.O. Box 6079, Station Downtown, H3C 3A7 Montréal (QC), Canada

Présenté au Congrès Algérien de Mécanique, CAM 2011, 14 -17 novembre 2011, Guelma, Algérie, 2011.

RÉSUMÉ Cet article décrit la technique d'amélioration de la précision d'usinage en utilisant la machine-outil comme machine à mesurer. En semi-finitions, la trajectoire d'outil issue du code G est comparée avec les résultats d'inspection par palpéage effectué sur machine-outil sans démontage de la pièce. En finition, le défaut attendu, prédit en utilisant l'inspection sur machine-outil et le modèle basé sur la compliance, est anticipé en modifiant la trajectoire d'outil. La méthode de séparation, des composantes rigide et compliant requise pour appliquer ce modèle de compensation, est expliquée et expérimentalement implantée. Les résultats expérimentaux montrent que la précision est améliorée grâce à cette technique de compensation. L'application de cette méthode pour un profil 2D, sous forme d'une aube, modélisé en utilisant les NURBS, a permis de réduire l'erreur d'usinage de 200 μm jusqu'à moins de 20 μm .

A.1 INTRODUCTION

Le fraisage est une opération de base dans la fabrication des pièces mécaniques sur machines-outils. À partir des dimensions imposées par le design, la machine est programmée pour effectuer l'enlèvement de la matière nécessaire pour l'obtention de la surface finale désirée. Ceci passe par le calcul de la trajectoire d'outil avec grande précision. Ce calcul complexe de trajectoire s'effectue actuellement avec succès grâce à des logiciels commerciaux, comme CATIA. Traditionnellement, l'inspection s'effectue après usinage. La pièce produite doit répondre à un critère de conformité dimensionnelle pour pouvoir l'assembler dans le mécanisme pour lequel elle est fabriquée et pour qu'elle accomplisse sa mission planifiée.

A cause de plusieurs sources de déviation de l'outil par rapport à la pièce, la géométrie générée par la coupe dévie par rapport à celle planifiée. Ce qui peut affecter la productivité en produisant des pièces hors tolérance.

Pour améliorer la précision d'usinage, de multiples recherches sont menées afin d'apporter un correctif à la trajectoire nominale de l'outil dans le but d'anticiper des déviations systématiques. La précision des pièces fabriquées sur machine-outil se trouve affectée par une multitude de sources d'erreur [1, 2] comme les défauts de fabrication et l'usure de la machine-outil, l'interaction machine-outil processus de fabrication [3], les vibrations et les fléchissements causés par l'effort de coupe [4, 5],..., etc.

Actuellement, les machines-outils sont équipées de systèmes de palpé. La pièce peut être inspectée sur la même machine sans démontage et sans procédure supplémentaire de fixation. Cette fonctionnalité offre l'opportunité d'inspecter la pièce avant la phase de finition pour estimer les défauts d'usinage en finition et formuler une correction de trajectoire afin de les anticiper. Dans ce cas, un nouveau rôle est attribué à la métrologie, en plus de sa mission traditionnelle, inspecter le produit final, elle participe dans l'amélioration du taux de conformité de la production [6]. L'usinage et l'inspection puis l'ajustement de trajectoire est une alternative de correction des erreurs d'usinage pour la même pièce [7] ou pour la pièce suivante [8]. Cette correction est basée initialement sur l'anticipation par l'inversion de l'erreur [7, 8]. Comme le montre la Figure A 1, le vecteur de compensation est l'inverse du vecteur d'erreur.

Théoriquement, la prédiction, pour compensation, du fléchissement peut être pratiquée lorsque la pièce est de géométrie simple permettant l'application des modèles standards de prédiction par

résistance des matériaux RDM. Kops [9] a établi une relation linéaire entre la profondeur de coupe et le fléchissement pour le tournage d'une barre cylindrique. Guiassa et Mayer [10] ont développés une nouvelle formulation de la correction radiale de trajectoire d'outil. Durant les phases de semi-finitions, la pièce est inspectée de façon intermittente après une ou après plusieurs coupe de semi-finitions pour avoir une bonne estimation de l'évolution de l'erreur d'usinage. La compliance de coupe est à l'origine de l'erreur causée par le fléchissement [9]. En semi-finition, un coefficient de compliance est mesuré, en utilisant le palpement sur machine-outil. En finition, il est prédit par extrapolation. Cette prédiction est utilisée pour estimer le fléchissement en finition pour pouvoir l'anticiper.

Cet article décrit une application de la méthode développée en [10] dans le cas d'un profil 2D sous forme d'une aube modélisé par NURBS. La technique de séparation est expliquée et expérimentalement implantée.

A.2 MODÈLE D'ERREUR D'USINAGE

L'erreur d'usinage, ε_m , détectée après la coupe par palpement sur machine-outil est principalement due à l'usure de l'outil de coupe et au fléchissement [7]. Alors elle s'écrit selon [10] comme suit :

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{to} + \varepsilon_r \quad (A-1)$$

avec

ε_m : déviation du profil usiné par rapport au profil programmé obtenu à partir du code G.

ε_{to} : erreur sur le diamètre de l'outil de coupe (*offset*). C'est la différence entre le diamètre effectif de l'outil et le diamètre théorique utilisé lors de la génération de trajectoire.

ε_r : erreur causée par la faible rigidité. C'est le fléchissement de l'ensemble outil, pièce et machine. Comme ε_r dépend des efforts de coupe et de la compliance du système, sa modélisation mathématique est complexe [11] Guiassa et Mayer relient la profondeur de coupe réelle avec la déformation (fléchissement), mesurée sur machine-outil, par une relation linéaire :

$$\varepsilon_r = \rho \quad d \quad (A-2)$$

avec

d : profondeur réelle de coupe obtenue par la mesure avant et après la coupe.

ρ : coefficient de la compliance de coupe. Il est contrôlé par plusieurs paramètres comme les conditions de coupe, la géométrie et les caractéristiques de l'outil de coupe, la compliance de la pièce et de la machine, etc. Durant les phases de semi-finitions, ce paramètre est calculé selon l'éq. 2 après la mesure de l'erreur et de la profondeur réelle de coupe.

Séparation des deux composantes d'erreur

La mesure sur machine-outil détecte l'erreur totale d'usinage, ε_m . Pour estimer l'erreur en finition en respectant le modèle, les équations (A-1)-(A-2), l'erreur d'*offset* (usure de l'outil) doit être estimée séparément. Comme ε_r dépend linéairement de la profondeur de coupe, la Figure A 2 montre l'estimation de ε_{to} , Figure A 3, lorsque la profondeur de coupe varie considérablement, de d_1 à d_2 , provoquant une variation significative de l'erreur ε_m (de ε_{m1} à ε_{m2}). Une estimation simple utilisant deux positions inspectées peut être formulée comme suit:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{m1} &= \varepsilon_{to} + \rho d_1 \\ \varepsilon_{m2} &= \varepsilon_{to} + \rho d_2 \end{aligned} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{to} = \frac{\varepsilon_{m1}d_2 - \varepsilon_{m2}d_1}{d_2 - d_1}$$

Alors, la mesure sur machine-outil est utilisée aussi pour estimer l'usure de l'outil de coupe.

A.3 MODÈLE DE COMPENSATION DE L'ERREUR D'USINAGE

Le modèle de compensation adopté est celui développé en [10]. En utilisant trois coupes de semi-finition et deux inspections avant la finition, la correction radiale est formulée comme suit:

$$C = \varepsilon_{to} + \frac{d_{nf} + \varepsilon_2}{d_2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_{to}) + \left(\frac{d_{nf} + \varepsilon_2}{d_2} \right)^2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (\text{A-3})$$

avec :

ε_{to} l'erreur d'*offset* de l'outil de coupe;

ε_2 et ε_1 : les erreurs d'usinage mesurées, respectivement, après la deuxième et après la première coupe de semi-finition;

d_2 : la profondeur réelle de coupe précédant celle de la finition;

d_{nf} : la profondeur nominale de coupe pour la passe de finition.

Contrairement à la technique de miroir [7, 8] [29, 31], qui inverse l'erreur et ne détaille pas les sources de l'imprécision d'usinage, ce modèle, l'éq.(A-3), estime une compensation selon les sources d'erreur:

l'usure de l'outil de coupe : (ε_{to}) ;

la compliance du système : $\frac{d_{nf} + \varepsilon_2}{d_2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_{to})$;

la variation de la compliance du système causée par l'enlèvement de la matière:

$$\left(\frac{d_{nf} + \varepsilon_2}{d_2} \right)^2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) .$$

A.4 TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Les essais expérimentaux ont été effectués dans le laboratoire de recherche en fabrication virtuelle (LRFV) de l'École Polytechnique de Montréal, Canada. La machine-outil 5-axes du manufacturier HURON, modèle KX8 Five est utilisée. Elle est équipée de système de palpation avec palpeur Renishaw-MP700. Pour fin de comparaison une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), de Mitutoyo Legex est utilisée.

La Figure A 4 montre une vérification de la capacité de mesure de la machine-outil. Un profil linéaire usiné et inspecté sur machine-outil est inspecté par comparateur. Une bague étalon inspectée sur machine-outil et sur machine à mesurer tridimensionnelle.

La Figure A 5 montre la pièce utilisée pour le test de compensation par le modèle éq.3. La forme 2D de cette aube est d'épaisseur variable (max 4 mm).

La Figure A 6 illustre l'engagement et la sortie de l'outil de coupe permettant d'avoir une variation de la profondeur de coupe dans la zone d'engagement où l'erreur d'usinage est supposée réduite à l'*offset* de l'outil de coupe.

La Figure A 7 montre la géométrie nominale de l'aube 2D et montre l'amplification, pour fin de visibilité, des déviations normales des profils obtenus par rapport à la géométrie nominale. Trois passes inspectées sont présentées où seulement la dernière passe est compensée.

L'erreur avant compensation varie de 20 μm (pour $x = 5 \text{ mm}$) jusqu'à 200 μm (zone de faible épaisseur, $x = 150 \text{ mm}$). Après compensation en utilisant le modèle, éq. 5, l'erreur est réduite jusqu'à moins de 20 μm le long de tout le profil.

A.5 CONCLUSION

Cet article présente la mise en application du modèle de compensation, basée sur la compliance, de l'erreur d'usinage. Un profil 2D d'épaisseur variable représentant une aube modélisée par NURBS est choisi pour effectuer les tests expérimentaux. Grace à la modification de la trajectoire estimée en utilisant ce modèle de compensation, l'erreur d'usinage est significativement réduite à la fois pour les zones rigide que pour les zones compliantes.

RÉFÉRENCES

1. Ramesh, R., Mannan, M. A., and Poo, A. N. (2000) Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40, 1235-1256.
2. Kline W. A., Devor, R. E., and Shareef, I. A. (1982) Prediction of surface accuracy in end milling, *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME* 104, 272-278.
3. Brecher, C., Esser, M., and Witt, S. (2009) Interaction of manufacturing process and machine tool, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58, 588-607.
4. Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., and Becker, A. A. (2006) An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, 542-551.

5. Myeong-Woo, C., Tae-il, S., and Hyuk-Dong, K. (2003) Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation, *Journal of Materials Processing Technology* 136, 88-99.
6. Kunzmann, H., Pfeifer, T., Schmitt, R., Schwenke, H., and Weckenmann, A. (2005) Productive metrology-adding value to manufacture, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54, 691-704.
7. Bandy, H. T., Donmez M.A., Gilsinn D.E., Kennedy M., Yee, K. W., Ling A. V., Wilkin N. D. (2001) A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection, *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 6811*, 1-77.
8. Lo, C.-C., and Hsiao, C.-Y. (1998) Method of tool path compensation for repeated machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38, 205-213.
9. Kops, L., Gould, M., and Mizrach, M. (1993) Improved analysis of the workpiece accuracy in turning, based on the emerging diameter, *Journal of engineering for industry* 115, 253-257.
10. Guiassa, R., and Mayer, J. R. R. (2011) Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 391-394.
11. Lan, J. V. L. (2007) Etude de méthodes simplifiées pour la simulation de l'usinage à l'échelle macroscopique, PhD thesis, ENSAM ParisTech, CER de Paris.

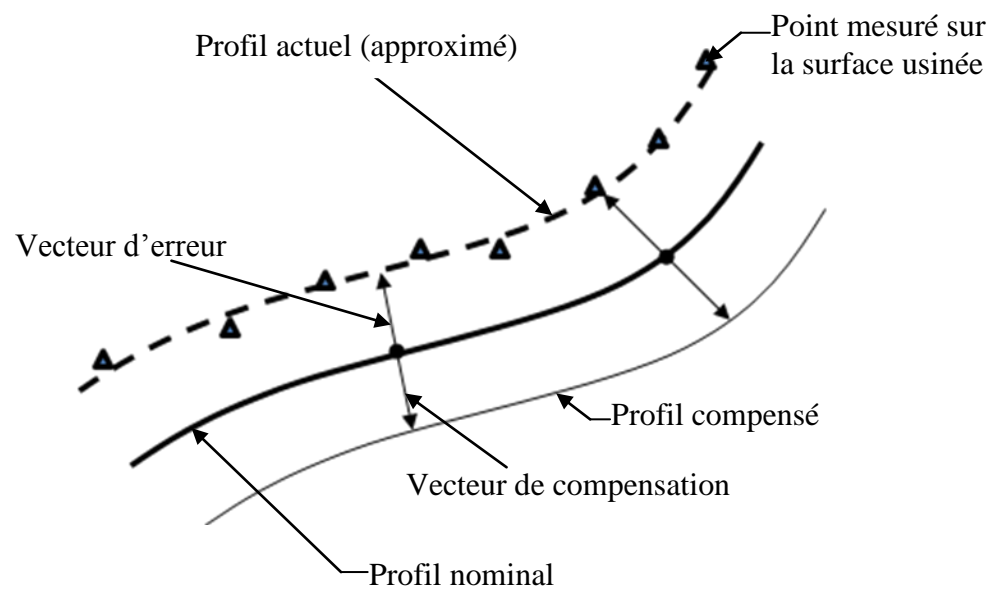


Figure A 1. Principe de miroir pour anticiper l'erreur d'usinage [7, 8]

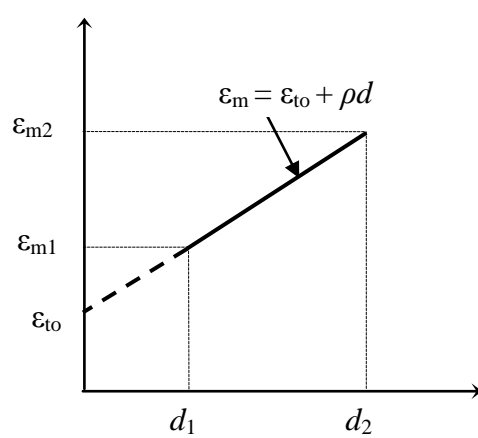


Figure A 2. Estimation de ε_{t0}

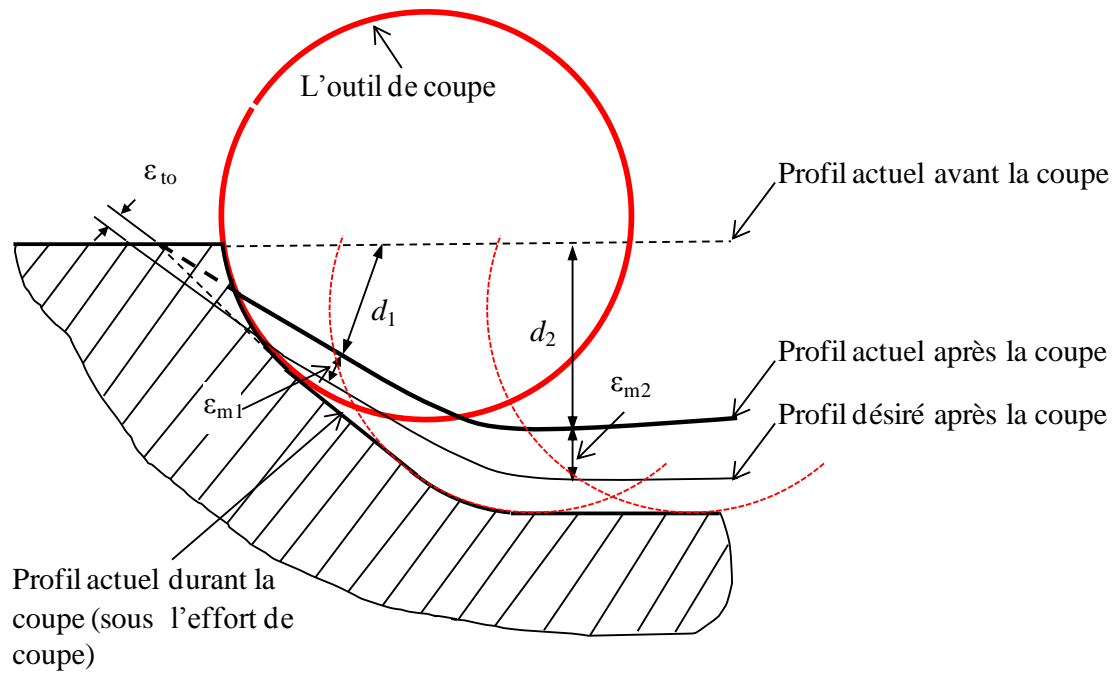


Figure A 3. Séparation des deux composantes d'erreur.

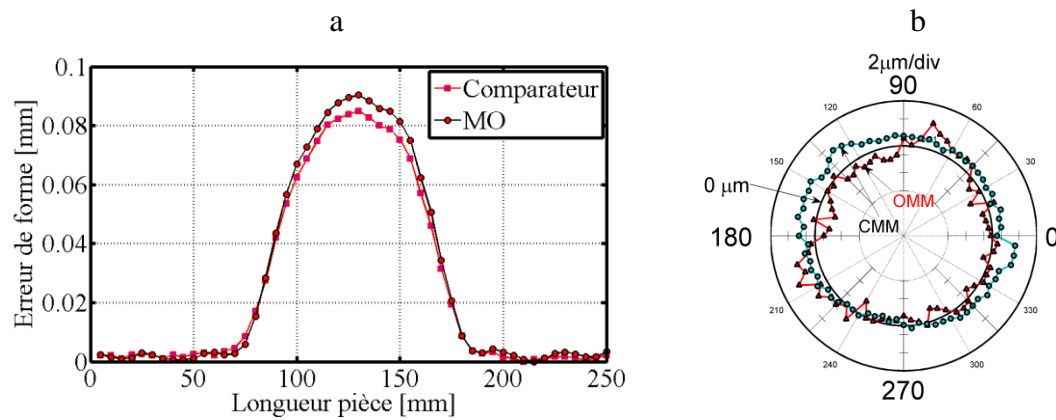
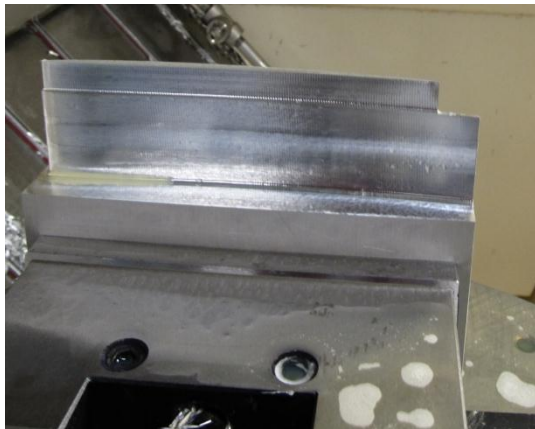


Figure A 4. Vérification du système de mesure sur machine-outil. a-comparaison du défaut de forme mesuré sur machine-outil directement après la coupe et le même défaut obtenu indépendamment par comparateur. b-variation par rapport aux dimensions nominales d'une bague étalon mesurée sur machine-outil (OMM) et sur machine à mesurer tridimensionnelle (CMM).



Paramètres de coupe	
Paramètre	Valeur
Vitesse de coupe	1000 mm/mn
Profondeur axiale	10 mm
Profondeur radiale	0.5 mm

Figure A 5. Profil 2D sous forme d'aube sur une pièce en aluminium et les paramètres de coupe utilisés.

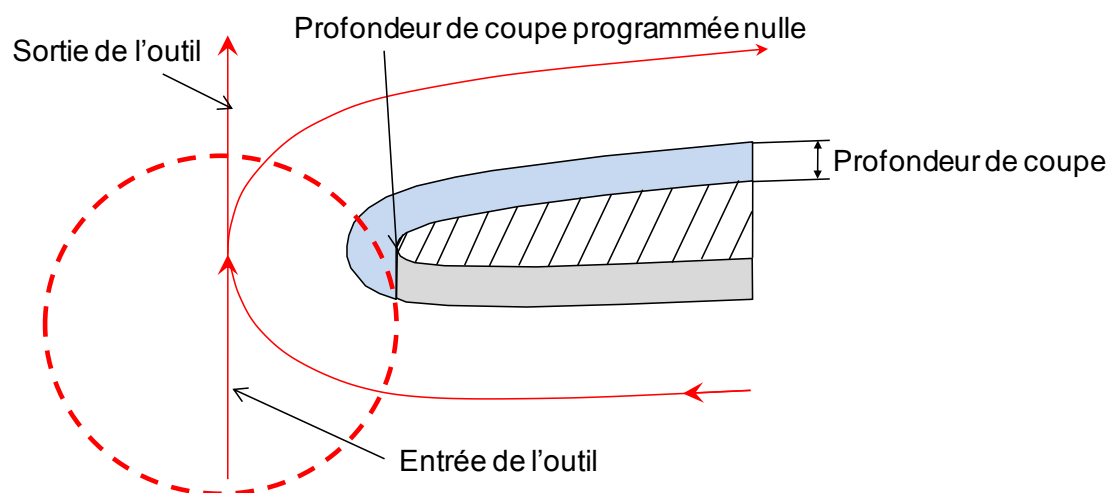


Figure A 6. Implémentation de la procédure d'estimation de l'erreur ε_{t_0}

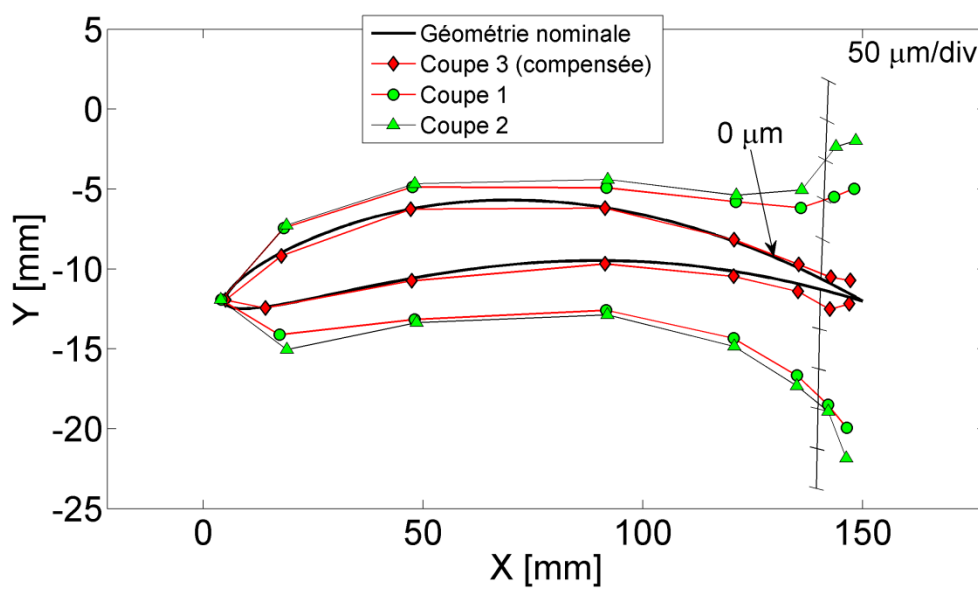


Figure A 7. Répartition de la déviation normale (amplifiée) au profil nominale le long du profil de l'aube 2D de la Figure A 5. L'erreur maximale est 212 μm , détectée après la semi-finition 2 dans la zone où la pièce est plus compliant (faible épaisseur). Après compensation, l'erreur maximale est moins de 20 μm .

ANNEXE B Practical implementation of the cutting compliance induced error compensation procedure

Rachid Guiassa¹ and René Mayer¹

¹ Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, P.O. Box 6079, Station Downtown, H3C 3A7 Montréal (QC), Canada

Proceeding of the CIGM 2011, 20-22 november, Skikda university, Algeria, 2011.

Keywords: Milling, error compensation, on machine probing, compliance.

Abstract

In order to improve the machining accuracy, the on-machine process intermittent probing (OMPIP) is applied. The systematic deviation caused by the system deflection and tool offset error is anticipated by a radial correction of tool path based on the predictive cutting compliance model. The procedure is experimentally tested for the milling of a 2D free form profile. Two identical profiles are cut, one with and the other without compensation. Results show error reduction from 0.143 mm, for the uncompensated tool path, to less than 0.015 mm after tool path compensation.

B.1 Introduction

The Machining process by metal cutting is one of principal techniques for mechanical part production. In order to obtain the desired geometry, the tool removes material from the part. This process requires cutting forces and specific relative motion between the tool and the part. The geometric accuracy of the machined part is affected by several sources of defect such as machine-tool performance limitations including motion error and NC command inaccuracy and the machining process limitations including machine-tool-part compliance and dynamic behavior under cutting forces [1]. In order to predict the part defect before machining, many investigations have been conducted to model the effects of error sources. This allows taking actions to compensate the undesired deviations. Virtual machining can be used [2]. Both The machine-tool performance and the machining process affect the part accuracy [3]. In order to compensate for the machine-tool inaccuracy, researchers predict the systematic deviation and apply correction to the tool path to obtain the desired tool path.

Machining process drawbacks deflections under the cutting forces, the tool wear and the dynamic behavior affect part accuracy. The cutting parameters selection procedure may reduce the dynamic vibration [4]. The deflection under cutting forces is critical source of inaccuracy [5, 6]. This may affect significantly the productivity of compliant components by imposing shallow depths of cut. finite Element analysis can be used to predict the systematic defect [7]. The error can also be reduced by actively controlling the compliance [8]. another approach is to use the measured errors on previous part for the next one [9].

On machine measurement (OMM) and process intermittent probing (PIP) can be used to inspect the part at the semi-finishing cuts. For the current part, the finishing cut can be adjusted to anticipate systematic deviation. But PIP cannot detect errors which occur both during probing and during machining such as the geometric errors of the machine tool. The machining error detected by PIP is regarded as the deviation of the measured profile compared to the programmed profile as a result of errors due to tool wear and to deflection of the tool, workpiece and machine [10]. This error can be compensated at the finishing cut through tool path modification by a radial correction equal to the error in the opposite direction [10, 11]. Recently, Guiassa and Mayer [12] develop a news estimation model of the tool path radial correction to compensate error detected by PIP.

This paper describes briefly the method developed by Guiassa and Mayer [12]. The 2D free form tool path is investigated for both error repeatability and effectiveness of the proposed model.

B.2 Error and compensation models

Error model

The machining error detected by PIP is derived by comparing the command (cutter location file) with PIP data. This error is dominated by the system deflection and the tool wear [10]. So, it is expressed from [12] as:

$$\varepsilon = \varepsilon_{to} + \varepsilon_r \quad (\text{B-1})$$

where ε_{to} is the tool offset error and ε_r is the system deflection under the cutting force due to the system compliance. ε_{to} is assumed constant along the cutting profile and it is independent of cutting forces. ε_r varies along the cutting profile according to the cutting force and the radial instantaneous compliance of the system machine-tool-part. It is approximated as:

$$\varepsilon_r = \rho \cdot d \quad (\text{B-2})$$

where d is the real cutting depth and ρ is the cutting compliance coefficient. ρ amalgamates several parameters such as:

- Experimental cutting coefficient for the pair tool/part;
- Cutting speed;
- System compliance (tool, part and machine).

Compensation Model

In a multiple cutting pass process, as shown in Figure B 1, the final designed dimension, D_{nf} , is desired after all cutting passes. With respect to the error model [12], for the i -th cut, eqs.(B-1-2) can be rewritten as:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{ri} \quad (\text{B-3})$$

where

$$\varepsilon_{ri} = \rho_i \cdot d_i \quad (\text{B-4})$$

and ε_{ri} , ρ_i and d_i are the deflection, the corresponding cutting compliance coefficient and the cutting depth respectively for the i -th cut. ε_{to} is assumed constant along the machined profile and during multiple cutting passes for the current part. The estimation procedure adopted is based on the depth of cut reduction experimentally implemented in [12]. The compensation estimation is based on the prediction of ρ_i for $i=f$ (f :the final cut). By measuring the results after previous cuts, ε_{ri} , ρ_i and d_i became known parameters for $i=1$ to $f-1$. At the finishing cut, the corresponding cutting compliance ρ_f is extrapolated by:

$$\rho_f = \sum_{j=1}^{f-1} \rho_j \cdot L_j \quad (\text{B-5})$$

where L_j are the Lagrange polynomials associated with the cumulated depth after each cut. More detail can be find in [12]. So, the radial compensation magnitude is formulated as:

$$C = \varepsilon_{to} + \rho_f d_f \quad (\text{B-6})$$

where d_f is the desired final cutting depth. It is the nominal (initial) depth d_{nf} plus the previous machining error ε_{f-1} :

$$d_f = d_{nf} + \varepsilon_{f-1} \quad (\text{B-7})$$

B.3 Practical implementation

Because the machining process removes material from the part, the cutting compliance parameter (eq.B-2) can increase by $\delta\rho_i$ after each cut.

In practice, the final geometry is achieved through a sequence of roughing and finishing cuts. The general evolution of the cutting compliance coefficient is illustrated in Figure B 2-a and a linearized evolution in Figure B 2-b. As indicated previously, the radial compensation estimation is based on the cutting compliance coefficient estimation for the final cut f . To reduce the number of inspected semi-finishing cuts and so doing increase productivity (production rate constraint) the cutting compliance coefficient estimation is linearized around the last semi-finishing cut ($f-1$) as in Figure B 2-b and can be written as:

$$\rho_f = \rho_{f-1} + \frac{\rho_{f-1} - \rho_{f-2}}{d_{f-1}} d_f \quad (\text{B-8})$$

To use the reduced model eq.(B-8) using only two inspected cuts, detail and condition can be find in [12].

B.4 Results

Experimental tests were conducted in the Virtual Machining Research Laboratory (VMRL/LRFV) of 'École Polytechnique de Montréal', Canada. The five axis machine tool of Huron, model KX8 Five is used. A Renishaw-MP700 probe is used for machined surface inspection on the machine-tool. In order to investigate the evolution of the cutting compliance coefficient, a multiple cutting pass process is applied for the aluminum straight thin wall shown in Figure B 3-a. The form defect measured after each cut, with programmed depth of 300 μm , is collected in Figure B 3-b which shows that the form defect increases after each cut. This can be explained by the increase in the system compliance. The second test part, Figure B 3-c and 3-d has a 2D free form. The nominal cutting depths are 0.5 mm.

In order to investigate the possible optimization of the production rate by omitting the measuring operation in mass production, two identical profiles are generated by multiple cutting inspected passes. Figure B 3 shows the part and CAD model. To cut the second profile under the similar conditions, the part is rotated by 180°.

Figure B 4. shows the error repeatability (repeated measurements obtained under similar circumstances) along the machined profile illustrated with the curvilinear parameter in a-. The results are shown in Figure B 5 for the uncompensated and the compensated tool path. The errors can be considered as reproducible for similar part and cutting conditions. For the same part, the error increases in multiple cutting passes process confirming the agreement with a reduction of the cutting compliance model. The error for the finishing cut had a maximum value 0.143 mm for the uncompensated cut (part 1). The compensation procedure reduces this error to 0.015 mm (part 2).

B.5 Conclusion

The new formulation of the tool path radial correction at the finishing cut based on measured profile errors at the semifinishing cuts, developed by Guiassa and Mayer [12] is applied for 2D free form profile (blade). The error was reduced from 0.143 mm in the uncompensated case to 0.015 mm after tool path compensation. Furthermore, two identical profiles were produced in the same part to verify the error reproductivity under similar circumstances.

The machining error can be improved for production using the proposed model without measuring each part.

References

- [1] Brecher C., M. Esser, and S. Witt, "Interaction of manufacturing process and machine tool," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 588-607, 2009.
- [2] Altintas Y., C. Brecher, M. Weck, and S. Witt, "Virtual Machine Tool," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, pp. 115-138, 2005.
- [3] Ramesh R., M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools -- a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1235-1256, 2000.
- [4] Altintas Y. and E. Budak, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, pp. 357-362, 1995.
- [5] Kops L., M. Gould, and M. Mizrach, "Improved analysis of the workpiece accuracy in turning, based on the emerging diameter," *Journal of engineering for industry*, vol. 115, pp. 253-257, 1993.
- [6] Myeong-Woo C., S. Tae-il, and K. Hyuk-Dong, "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, pp. 88-99, 2003.
- [7] Ratchev S., S. Liu, W. Huang, and A. A. Becker, "Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 1629-1641, 2004.
- [8] Matsumoto K., Y. Hatamura, and M. Nakao, "Actively Controlled Compliance Device for Machining Error Reduction," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, pp. 313-316, 2000.
- [9] Liu Z. Q. and P. K. Venuvinod, "Error compensation in CNC turning solely from dimensional measurements of previously machined parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 48, pp. 429-432, 1999.

- [10] Bandy H. T., Donmez M.A., Gilsinn D.E., Kennedy M., Yee, K. W., Ling A. V., Wilkin N. D., "A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection," *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 6811*, pp. 1-77, 2001.
- [11] Lo C.-C. and C.-Y. Hsiao, "Method of tool path compensation for repeated machining process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 205-213, 1998.
- [12] Guiassa R. and J. R. R. Mayer, "Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 391-394, 2011.

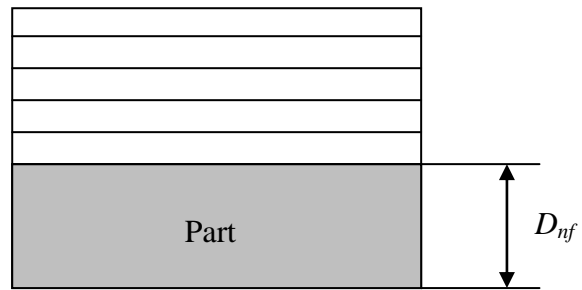


Figure B 1. Multiple cutting passes design

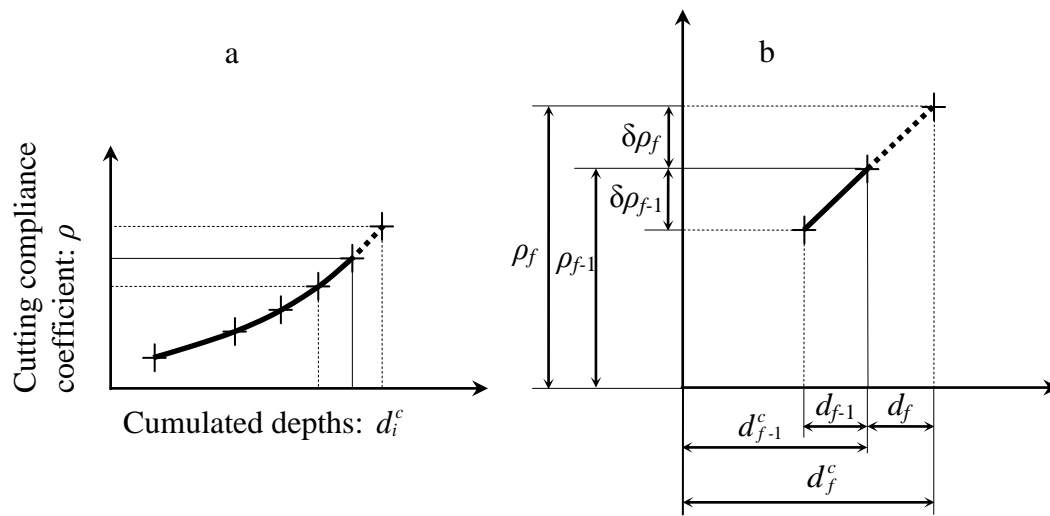
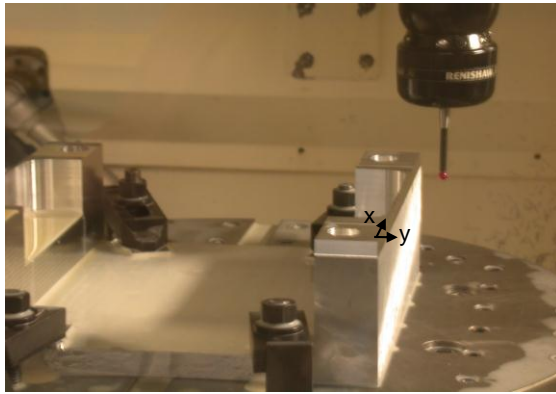
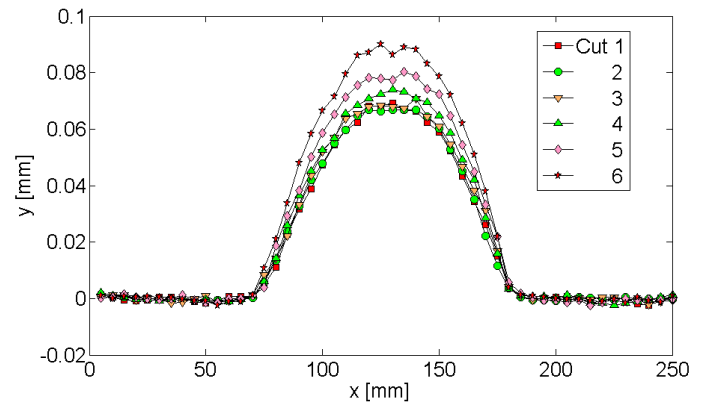


Figure B 2. Cutting compliance coefficient: a- general model, b- linearized model



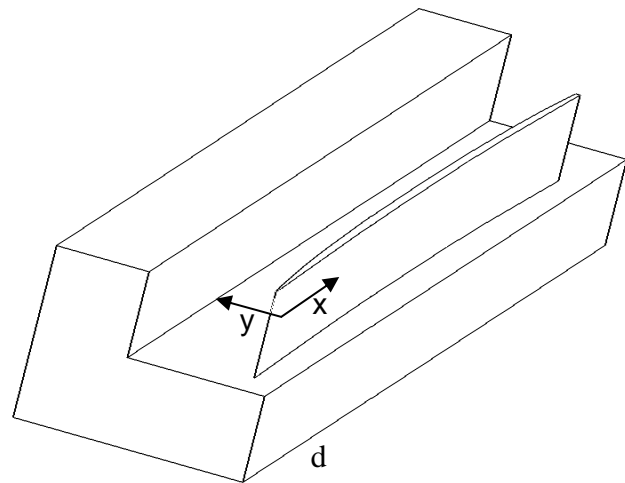
a



b



c



d

Figure B 3. Experiments: a) Straight thin clamped wall. b) Form defect in multiple cutting passes of the part in a). c) Test part with 2D free form (blade). d) CAD model of the part in c).

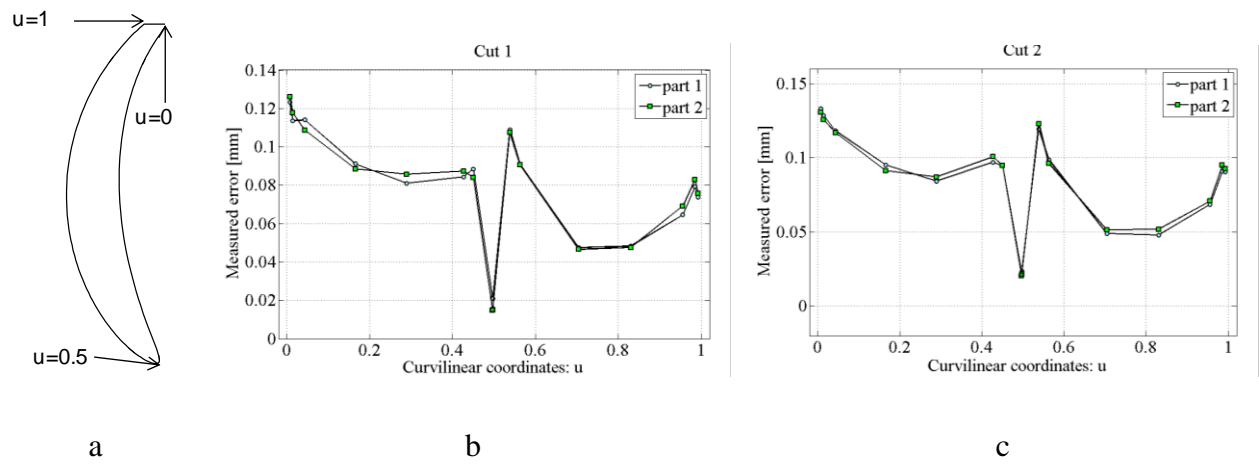
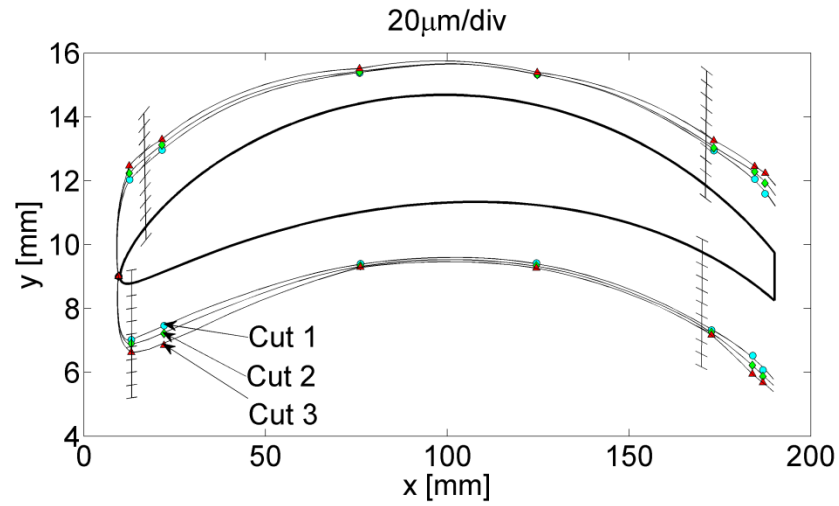
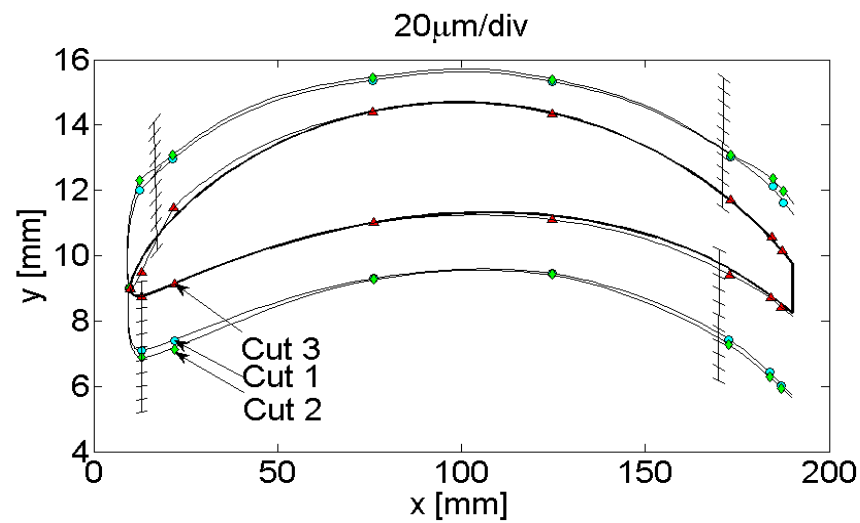


Figure B 4. Machining error comparison: a- curvilinear coordinate parameter, b- cut 1 and c- cut



a) Part 1 uncompensated



b) Part 2 finishing cut compensated

Figure B 5. Results: The amplified normal deviation of the measured profile compared to the desired profile. Three successive inspected cuts for a) the first profile (uncompensated) and for b) the second profile (3-th cut compensated)

ANNEXE C Continuous tool path compensation using discrete on machine measurement

Rachid Guiassa¹, René Mayer² and Marek Balazinski³

^{1,2,3}Mechanical Engineering Department, École Polytechnique de Montréal, P.O. Box 6079

Station Centre-ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7

¹rachid.guiassa@polymtl.ca ²rene.mayer@polymtl.ca ³marek.balazinski@polymtl.ca

Presented in 1st International conference on virtual machining process technology, 28 May to 1 June 2012, École Polytechnique, Montréal, Canada

Abstract: Timely measurement provides information about the cutting process which allows immediate remedial action to be taken so that good parts are produced. In order to improve the accuracy of machined part, on machine measurement (OMM) and process intermittent probing (PIP) are first used to inspect the part, after the semi-finishing cuts, and then, a compensation is computed and added to the tool path for the finishing cut. The cutting compliance model is applied to compute the normal correction of the tool path so that the anticipated systematic defect first is estimated and then, is cancelled. The tool path is converted to continuous B-spline function and is compensated through B-spline control point adjustment.

Keywords: Milling, accuracy, on machine probing, error modeling, error compensation.

INTRODUCTION

The machining process is one of the principal techniques for mechanical part production. In order to obtain the desired geometry, the tool removes material from the part. This process requires cutting forces and specific relative motion between the tool and the part. The geometric accuracy

of the machined part is affected by several sources of defect such as machine-tool performance limitations including motion error and NC command inaccuracy as well as machining process limitations including machine-tool-part compliance and dynamic behaviour under cutting forces [Brecher *et al.*, 2009] and [Ramesh and Tiller, 2000]. To predict the part defect before machining, many investigations have been conducted to model the effects of error sources. This allows taking actions to compensate the expected undesired deviations. Virtual machining can also be used [Altintas *et al.*, 2005].

The machining process drawbacks are deflections under the cutting forces, tool wear and the dynamic behaviour. The cutting parameters selection procedure may reduce the dynamic vibration [Altintas and Budak, 1995]. The deflection under cutting forces is critical source of inaccuracy [Kops *et al.*, 1994] and [Myeong-Woo *et al.*, 2003]. This may affect significantly the productivity of compliant components by imposing shallow depths of cut. Finite Element analysis can be used to predict the systematic defect [Ratchev *et al.*, 2004].

On machine measurement (OMM) and process intermittent probing (PIP) can be used to inspect the part at the semi-finishing cuts. So that, for the current part, the finishing cut can be adjusted to anticipate systematic deviation. This error is dominated by the tool wear and the deflection [Bandy *et al.*, 2001] and it can be compensated at the finishing cut through tool path modification by a normal correction equal to the error in the opposite direction. Recently, a new estimation model of the tool path normal correction was proposed to compensate the on-machine measured error [Guiassa and Mayer, 2010].

The compensation procedure can be implemented at the design steps. So the substituted geometry of the part is modified [Ramon, 2004]. This technique may need additional updating of the design parameters to ensure the geometric continuity between features. To avoid this sensitive task, only the G-code can be modified [Biermann *et al.*, 2010]. This approach can provide rapid adjustment of the tool path which is desirable online. In [Biermann *et al.*, 2010], the G-code is converted to B-spline function. The compensation is based on the B-spline volume deformation according to the deformation at a sufficient number of discrete points computed using finite element model.

This paper briefly recalls the method developed in [Guiassa and Mayer, 2011]. Then, a 2D free form tool path (G-code) deformation technique is presented based on discrete measured error

compensation and a linear repartition of the compensation to allow the B-spline adjustment and subsequent G-code modification.

COMPENSATION OF ON MACHINE MEASURED ERROR

Error model

By probing the manufacturing surface, the machine tool detects the error due to tool offset error and deflection [Guiassa and Mayer, 2011]. In a multi-pass process, as shown in Fig., the final designed dimension, D_{nf} , is desired after all cutting passes. The error model [45], for the j -th measured error of the i -th cut, can be written as:

$$\varepsilon_{i,j}^* = \varepsilon_{to} + \varepsilon_{ri,j}^* \quad (1)$$

where ε_{to} is the tool offset error and

$$\varepsilon_{ri,j}^* = \rho_{i,j}^* \cdot d_{i,j}^* \quad (2)$$

is the system deflection at the position j of the cut i , ρ^* and d^* are the cutting compliance coefficient and the actual depth of cut respectively, they varies along the cutting profile according to the cutting force and the normal instantaneous compliance of the system machine-tool-part.

Compensation Model

The compensation estimation is based on the prediction of the cutting compliance coefficient $\rho_{f,j}^*$ for the finishing cut. By measuring the results after previous cuts, $\rho_{i,j}^*$ and $d_{i,j}^*$ become known parameters for $i=1$ to $f-1$. At the finishing cut, the corresponding cutting compliance $\rho_{f,j}^*$ is extrapolated by:

$$\rho_{f,j}^* = \sum_{i=1}^{f-1} \rho_{i,j}^* L_{i,j} \quad (3)$$

where L_j are the Lagrange basis polynomials associated with the cumulated depth after each cut [Guiassa and Mayer, 2011]. So, the normal compensation magnitude is formulated, for a three-pass process, as:

$$c_j^* = \varepsilon_{to} + \frac{d_{3,j}^*}{d_{2,j}^*} \cdot \varepsilon_{r2,j}^* + \left(\frac{d_{3,j}^*}{d_{2,j}^*} \right)^2 (\varepsilon_{r2,j}^* - \varepsilon_{r1,j}^*) \quad (4)$$

where $d_{3,j}^*$ is the desired final cutting depth (cut 3). It is the nominal (initial) depth $d_{n3,j}^*$ plus the previous machining error $\varepsilon_{r2,j}^*$ (error at the cut 2):

$$d_{3,j}^* = d_{n3,j}^* + \varepsilon_{r2,j}^* \quad (5)$$

TOOL PATH DEFORMATION ACCORDING TO DISCRET_e COMPENSATIONS

The NC program is converted to B-Spline function of control points P and a sequence of knots T as:

$$F(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \cdot P_i = [x(u) \quad y(u) \quad z(u)] \quad (6)$$

where $N_{i,p}$ is the basis function of degree p .

The number and the positions of the control points are computed with respect the chordal error tolerance ϵ and a least-squares minimization related to eq. 6. [Piegl *et al.*, 1997].

Figure C2 shows the steps to compensate the NC code. The NC code should be convertible into a set of data points representing the geometry of the machined surface. Furthermore, additional subdivision may be needed to permits the possible deformation [Biermann *et al.*, 2010]. To convert the NC code into B-spline, chord length parameterization is adopted to associate each point with a parameter \bar{u}_s . The knots sequence is selected based on the data points distribution [Piegl *et al.*, 1997].

The B-spline function $F(u)$ is defined by solving eq. 6 in a least-squares sense for the unknown, control points, P . In order to compute the parameters u^* , curvilinear coordinate of the measured points, the measured data points are projected onto F . Generally, the numbers of data points from the NC code are higher than the number of measured points. So, using only measured points, it may not possible to reproduce the target shape using the reverse engineering. To adjust the B-spline, all the initial data points are adjusted (Figure C3.) by adding a compensation distributed with respect to the measured points as:

$$\bar{F}_s = F(\bar{u}_s) + \bar{c}_s \cdot \mathbf{n}_s(\bar{u}_s) \quad (7)$$

where \mathbf{n}_s is the normal vector of the B-spline at the point of parameter \bar{u}_s and

$$\bar{c}_s = c_k^* + (c_{k+1}^* - c_k^*) \cdot \frac{\bar{u}_s - u_k^*}{u_{k+1}^* - u_k^*} \quad (8)$$

is the adjustment of the point of coordinate \bar{u}_s , computed by a linear combination of the compensations at u_{k+1}^* and u_k^* so that $u_k^* \leq \bar{u}_s < u_{k+1}^*$. The modified B-spline has the same knots sequence of the initial one. The control points are computed by resolving the minimization problem:

$$(\bar{F}_s - \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_s) \cdot P_i') \rightarrow \min \quad (9)$$

The modified B-spline is the compensated tool path. It can be used directly by the machine tool controller or it can be subdivided into a set of linear segments with respect to chord error tolerance to generate the G-code with basic commands (G01).

Experiments

The part, shown in Figure C 5, has a 2D profile as represented in Figure C 4. The G-code, generated by processing the cutter location file produced by CATIA, is converted to a B-spline curve. The distribution of u along the designed shape is shown in Figure C 4. Figure C 6. shows the discrete normal compensations computed using eq. 4 and the continuous compensation of the initial B-spline curve computed by the control points adjustment (eq. 9).

Figure C 7. shows the normal deviation of the machined profiles compared to the programmed profile of the uncompensated cuts (Cut 1-2) and the compensated one (Cut 3). For the uncompensated cuts, the maximum normal deviation is 0.130 mm. After compensation, the maximum deviation is less than 0.015. It gives a 90% of accuracy improvement.

Conclusion

This paper presents a finishing cut path compensation using B-spline adjustment according to discrete compensations computed using the cutting compliance coefficient model. The adjusted B-spline can be directly used as input for machine tool controller or can be subdivided in linear segments to apply the basic G-commands (G01). The second approach is applied for the present tests.

REFERENCES

- [**Altintas et al., 2005**] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., and Witt, S.; "Virtual Machine Tool"
In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2):115-138.
- [**Altintas and Budak, 1995**] Altintas, Y., Budak , E.; "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling"; In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44(1):357-362.
- [**Bandy et al., 2001**] Bandy, H.T., Donmez, M.A., Gilsinn, D.E., Kennedy, M., Yee, K. W., Ling, A. V., Wilkin, N. D.; "A methodology for compensating errors detected by process-intermittent inspection"; In: *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*, - 6811: 1-77.
- [**Biermann et al., 2010**] Biermann, D., Sacharow, A., Surmann, T., Wagner, T.; "Direct free-form deformation of NC programs for surface reconstruction and form-error compensation"; In: *Production Engineering*, 4(5):501-507.
- [**Brecher et al., 2009**] Brecher, C., Esser, M., Witt, S.; "Interaction of manufacturing process and machine tool."; In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):588-607.
- [**Guiassa and Mayer, 2011**] Guiassa, R., Mayer, J.R.R.; "Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing"; In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1):391-394.
- [**Kops et al., 1994**] Kops, L., Gould, M., Mizrach, M.; "A search for equilibrium between workpiece deflection and depth of cut: Key to predictive compensation for deflection in turning"; In: *ASME-PED* 68:819-825.
- [**Myeong-Woo et al., 2003**] Myeong-Woo, C., Tae-il, S., Hyuk-Dong, K.; "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation" In: *Journal of Materials Processing Technology*, 136:88-99.

- [Piegl et al., 1997]** Piegl, L., Tiller, W.; "The NURBS Book (Monographs in Visual Communication)" In: *Springer-Verlag*, New York (Second ed.).
- [Ramesh and Tiller, 2000]** Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N.; "Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors" In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9):1235-1256.
- [Ramon, 2004]** Ramon F, S.; "Modifying CAD/CAM surfaces according to displacements prescribed at a finite set of points" In: *Computer-Aided Design*, 36(4):343-349.
- [Ratchev et al., 2004]** Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., Becker, A. A.; "Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts" In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(15):1629-1641.

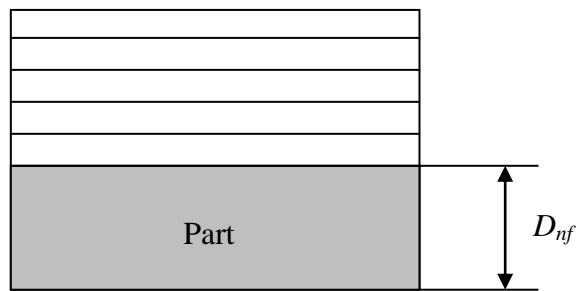


Figure C 1. Multi-pass process

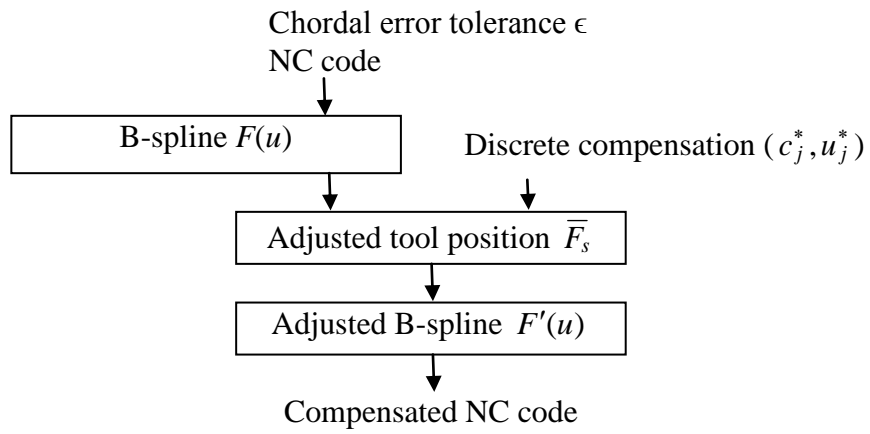


Figure C 2. NC code deformation process

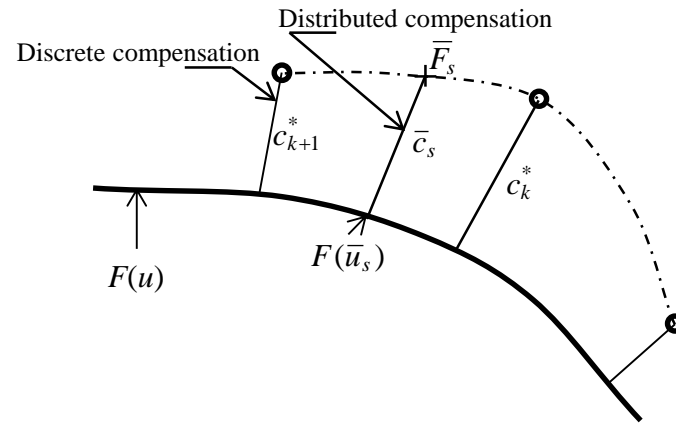


Figure C 3. Data points adjustment

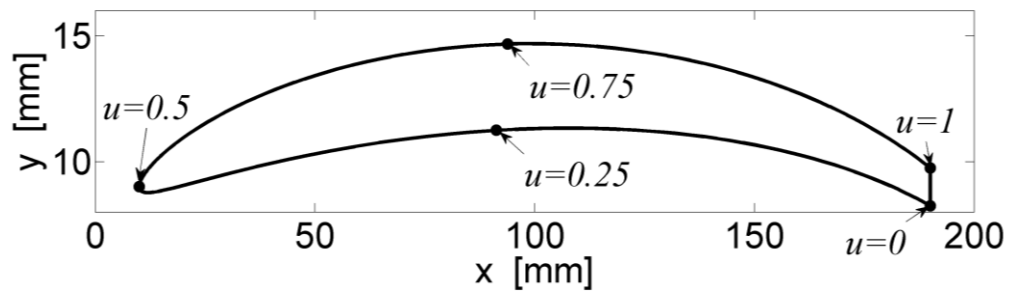


Figure C 4. Curvilinear parameter value along the 2D B-spline curve of the desired profile

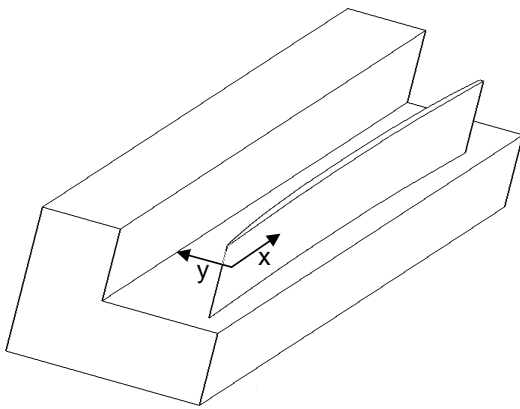


Figure C 5. Designed and manufactured shape

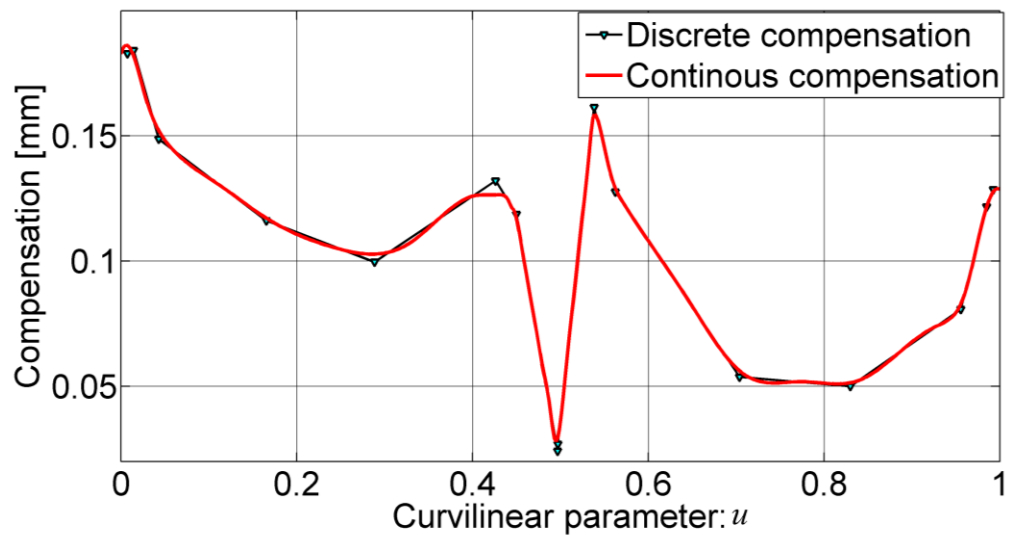


Figure C 6. Discrete and continuous (B-Spline) compensation

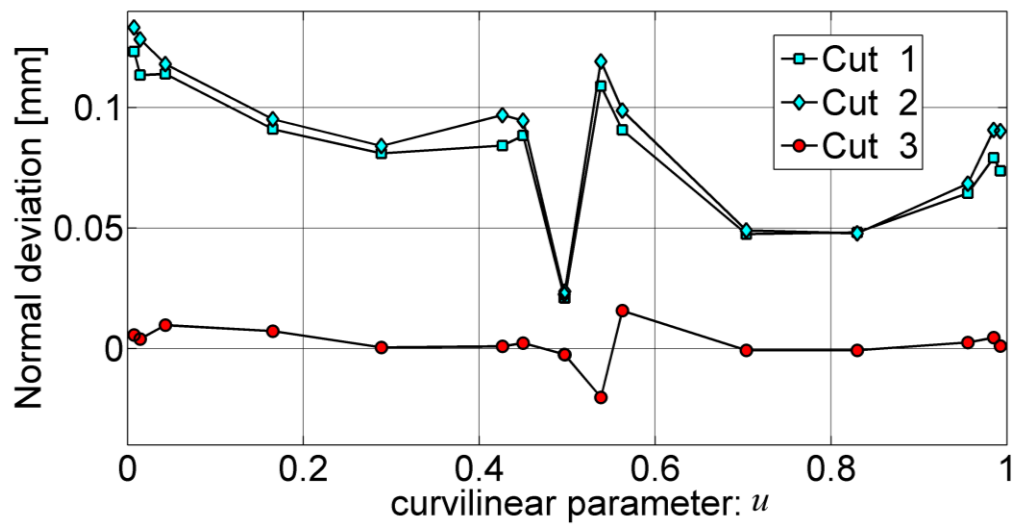


Figure C 7. The normal deviations of the machined profile, cut 1 and 2 are without compensation, cut 3 is with compensation.